



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SU POMPALAMA İÇİN YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Omar Abdulkareem Qasim QASIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Omar Abdulkareem Qasim QASIM tarafından hazırlanan “SU POMPALAMA İÇİN YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI” adlı tez çalışması 26/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Faruk KÖSE

.....

Danışman

Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Omar Abdulkareem Qasim
QASIM

26.10.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SU POMPALAMA İÇİN YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Omar Abdulkareem Qasim QASIM

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

2022, 74 Sayfa

Jüri

Danışman: Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

Doç. Dr. Faruk KÖSE

Doç. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi kullanılarak yaklaşık 80 m derinlikten, günlük ortalama 8-10 ton bir çiftliğin su ihtiyacını karşılamak amacıyla bir rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Bu sayede tarımsal üretimde önemli bir maliyete sebep olan su pompalama için gerekli enerjiyi yenilenebilir kaynaklardan sağlayarak bu maliyeti daha aşağıya çekmek hedeflenmiştir. Tasarım rüzgar hızı olarak bölgenin ortalama rüzgar hızı 5 m/s kabul edilmiştir. 12, 24 ve 36 kanatlı yatay eksenli tasarlanan rüzgar türbinlerinin 1/10 ölçekli modellerinin deneysel çalışmaları rüzgar tüneline ve nümerik çalışmaları ise ANSYS FLUENT programı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) analiz metodu kullanılarak yapılmıştır. Türbin uç-hız oranı $\lambda=1$ için kanat hız üçgenleri çizilerek kanat profilleri Solidworks programı ile oluşturulmuş ve üçboyutlu yazıcı kullanılarak imal edilmiştir. Nümerik analiz sonucunda 24 kanatlı türbine göre 12 kanatlı türbin gücü yaklaşık % 46 daha düşük fakat 36 kanatlı türbin gücü ise % 12 daha fazla çıkmıştır. Deneysel sonuçlarda ise 24 kanatlı türbine göre 12 kanatlı türbin gücü yaklaşık % 39 daha düşük fakat 36 kanatlı türbin gücü ise yaklaşık % 10 daha fazla çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini, Rüzgar enerjisi, Yatay eksenli rüzgar türbini (HAWT), Rüzgar türbini ile su pompalama.

ABSTRACT

MASTER of SCIENCE THESIS

DESIGN of HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE for WATER PUMPING

Omar Abdulkareem Qasim QASIM

**THE GRADUATE SCHOOL of NATURAL and APPLIED SCIENCE of
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE of MASTER of SCIENCE
in MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

2022, 74 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Ahmet SAMANCI

Doç. Dr. Faruk KÖSE

Doç. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

In this study, a wind turbine was designed to meet the water needs of a farm of 8-10 tons per day, from a depth of approximately 80 m, using wind energy from renewable energy sources. In this way, it is aimed to reduce this cost by providing the energy required for water pumping, which causes a significant cost in agricultural production, from renewable sources. The average wind speed of the region was accepted as 5 m/s as the design wind speed. Experimental studies of 1/10 scale models of wind turbines designed with 12, 24 and 36 blades horizontal axis were carried out in a wind tunnel and numerical studies were carried out using ANSYS FLUENT program and Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis method. For turbine tip-speed ratio $\lambda=1$, blade velocity triangles were drawn and blade profiles were created with Solidworks program and manufactured using a 3D printer. As a result of the numerical analysis, the power of the 12 bladed turbine was approximately 46% lower than the 24 bladed turbine, but the 36 bladed turbine power was 12% higher. In the experimental results, 12 blade turbine power is approximately 39% lower than 24-blade turbine, but 36 blade turbine power is approximately 10% higher.

Keywords: Wind turbine, Wind energy, Horizontal axis wind turbine (HAWT), Windmill for water pumping.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlamasında, araştırılmasında ve oluşumunda bana rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Ahmet SAMANCI' ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bana hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Omar Abdulkareem Qasim QASIM
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Rüzgar Enerjisi	1
1.2. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinlerin Tarihsel Arka Planı.....	2
1.3. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri	2
1.4. Su Pompaları	3
1.5. Tezin Amacı	5
1.6. Tezin Önemi	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. TEORİ ve TANIMLAR	12
3.1. Betz Teorisi	12
3.2. Dönen Kanat Üzerindeki Havanın Etkisi	12
3.3. Kanat Elemanı Teorisi.....	13
3.4. Rüzgar Enerjisinden Elde Edilen Güç (P).....	14
3.5. Tork (T)	14
3.6. Boyutsuz Katsayılar	14
3.6.1. Katılık Oranı (σ).....	14
3.6.2. Uç Hızı Oranı (λ).....	15
3.6.3. Reynold Sayısı (Re)	15
3.6.4. Güç Katsayısı (C_P)	15
3.6.5. Tork Katsayısı (C_T)	15
3.6.6. Su Pompalama Gücü (P_{Pompa}).....	15
3.7. Modelleme	16
3.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Temelleri.....	16
4. MATERYAL ve YÖNTEM	18
4.1. Materyal	18
4.2. Yöntem	25
4.2.1. Deneysel Çalışma Yöntemi	25
4.2.2. Nümerik Çalışma Yöntemi	25
5. NÜMERİK ve DENEYSEL ÇALIŞMA	26
5.1. Nümerik Çalışma.....	26
5.1.1. Kontrol Hacminin Oluşturulması.....	26
5.1.2. Ağ Yapısının Oluşturulması	27

5.1.3. Çözücü Seçimi	29
5.1.4. Türbülans Modelinin Seçilmesi	29
5.1.5. Akış Özellikleri ve Sınır Koşulları	29
5.1.6. Çözüm Yöntemi Seçimi	31
5.1.7. Simülasyon Sonuçları	31
5.1.8. Nümerik Analiz Sonuçları ve Tartışma	46
5.2. Deneysel Çalışma	49
5.2.1. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Tartışma	50
5.2.2. Deneysel Bulguların Hata Analizi	53
5.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmanın Karşılaştırılması	56
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	58
6.1. Sonuçlar	58
6.2. Öneriler	58
KAYNAKLAR	59
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER ve KISALTMALAR

A_b	Kanat alanı (m ²)
A_r	Rotor alanı (m ²)
A_s	Rotorun süpürme alanı (m ²)
a	Kanatın üst taraf uzunluğu (m)
b	Kanatın alt taraf uzunluğu (m)
C_p	Güç katsayısı
C_T	Tork katsayısı
D	Rotor çapı (m)
F	Kuvvet (N)
k	Kinetik enerji (m ² /s ²)
L	Kanat uzunluğu (m)
N_{kanat}	Kanat sayısı
N	Rotor devir sayısı (devir/dakika)
P_{max}	Maksimum güç (W)
$P_{rüzgar}$	Rüzgardan elde edilen güç (W)
P_{pompa}	Pompa gücü (W)
R	Rotor yarı çapı (m)
Re	Reynold sayısı
T	Tork (N.m)
$V_{çıkış}$	Rüzgar çıkış hızı (m/s)
$V_{giriş}$	Rüzgar giriş hızı (m/s)
$V_{teğetsel}$	Teğetsel hız (m/s)
p	Basınç (N/m ²)
ω	Açısal hız (rad/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
λ	Uç-hız oranı
σ	Katılık oranı
α_1	Rüzgarın kanata giriş açısı (°)
α_2	Rüzgarın kanattan çıkış açısı (°)
η_{pompa}	Su pompası verimliliği
g	Yer çekimi (m/s ²)
H	Pompa basma yüksekliği (m)
Q	Su debisi (ton/gün)
U	Voltaj (volt)
I	Akım (amper)

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı, insan uygarlığının gelişmesi nedeniyle eski çağlardan beri insanların en büyük sorunlarından biri olmuştur. Dolayısıyla insan nüfusunun artmasıyla birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır. Günümüzde günlük hayatta kullanılan ve temel olarak yenilenebilir enerji ve yenilenemez enerji kaynakları olarak sınıflandırılan birçok enerji kaynağı türü bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji genellikle doğal kaynaklardan veya yenilenen süreçlerden üretilen temiz enerji kaynağını temsil etmektedir. (Serkan 2003).

Küresel ısınma, çevre kirliliği ve enerji güvenliği ile ilgili artan endişeler, fosil yakıtların ikamesi olarak rüzgar, güneş, hidroelektrik, jeotermal, hidrojen ve biyokütle gibi yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarının geliştirilmesine olan ilgiyi artırmıştır. Rüzgar enerjisi, küresel iklim değişikliği ve enerji sorununa uygun çözümler sağlayabilir. Rüzgar enerjisi, enerji kaynaklarını daha da genişleterek, fiyat ve arz istikrarsızlığından etkilenen fosil yakıtların kullanımını önemli ölçüde azaltmakta ve aynı zamanda küresel enerji güvenliğini güçlendirmektedir. Son otuz yılda, dünya çapında rüzgar enerjisi üzerinde büyük bir büyüme görüldü. 2009 yılında, küresel yıllık kaydedilen rüzgar üretim kapasitesi 37 GW'ın üzerine çıkarak dünyanın toplam rüzgar kapasitesini 158 GW'a çıkardı. En umut verici yenilenebilir, güvenilir ve temiz enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin, önümüzdeki on yıllarda elektrik üretimi ve su pompalama için çok daha büyük bir paya sahip olması beklenmektedir.

1.1. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, yeni enerji üretiminin ana akım enerji kaynağını ve dünya enerji piyasasında önemli bir faktörü temsil eder. Dünyanın aldığı toplam güneş enerjisinin yaklaşık 1.8×10^{11} MW olduğu tespit edilmiştir. Bu güneş enerjisi girdisinden sadece %2'si (yani, $3,6 \times 10^9$ MW) rüzgar enerjisine dönüştürülür ve rüzgar enerjisinin yaklaşık %35'i dünya yüzeyinin 1000 m'si boyunca tüketilir (Nelson 2009). Bu nedenle, diğer enerji biçimlerine dönüştürülebilen mevcut rüzgar gücü yaklaşık $1,26 \times 10^9$ MW'dır. Bu değer, mevcut küresel enerji tüketiminin 20 katını temsil ettiğinden, rüzgar enerjisi temelde dünya ihtiyacının tüm enerjisini karşılayabilmektedir. Geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla rüzgar enerjisinin birçok faydası ve avantajı vardır.

Zararlı gazlar yayan fosil yakıtlar ve radyoaktif atıklar üreten nükleer enerji gibi geleneksel enerji kaynaklarının aksine, rüzgar enerjisi temiz ve çevre dostu bir enerji

kaynağıdır. Kesintisiz ve serbest bir enerji kaynağı olarak, dünyanın çoğu bölgesinde mevcut ve bol miktarda bulunmaktadır. Ayrıca rüzgar enerjisinin daha yaygın kullanılması, günümüzde tüketimleri nedeniyle bu yüzyılda bir gün bitebilecek olan fosil yakıtlara olan talebin azalmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, rüzgar enerjisinin kWh başına maliyeti güneş enerjisine göre çok daha ucuzdur (El-Ali ve diğerleri 2007). Bu nedenle, en umut verici enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin, son yüzyılda küresel güç arzında kritik bir rol üstleneceğine inanılmaktadır.

1.2. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinlerin Tarihsel Arka Planı

Çok kanatlı rüzgar türbinleri, Şekil 1.1' de açıklandığı gibi, dönen bir şaft üzerine sabitlenmiş kanatları kullanarak rüzgarın enerjisini çekmeye yarayan bir cihazdır.

Bu kanatlar belli bir açıyla monte edilir ve kanat boyunca hafif bir bükülme verilir, böylece rüzgarın onlara karşı kuvveti iki bileşene ayrılır ki bunlardan biri kanat düzleminde dönüş sağlar.

Su çarkları gibi, rüzgar türbinleri de bir güç kaynağı olarak insanların yerini alan ilk hareket ettiriciler arasındaydı. rüzgar pompalı su sistemleri kullanımı Avrupa'da 12. yüzyıldan 19. yüzyılın başlarına kadar giderek yaygınlaşmıştır. İçten yanmalı motorların gelişmesi ve elektrik gücünün yaygınlaşmasıyla I. Dünya Savaşı'nın ardından hızla çöküşleri başlamış, ancak o zamandan beri rüzgar gücüyle elektrik üretimi giderek daha fazla deneye konu olmuştur (Britannica 2019).

1.3. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Çok kanatlı rüzgar türbinleri, genellikle rüzgar hızı düşük bölgelerde rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve bu enerjiyi çeşitli sulama kullanımları için su pompalamak için kullanan bir cihazdır ve rüzgar enerjisinden yararlanmanın en eski yöntemlerden biridir.

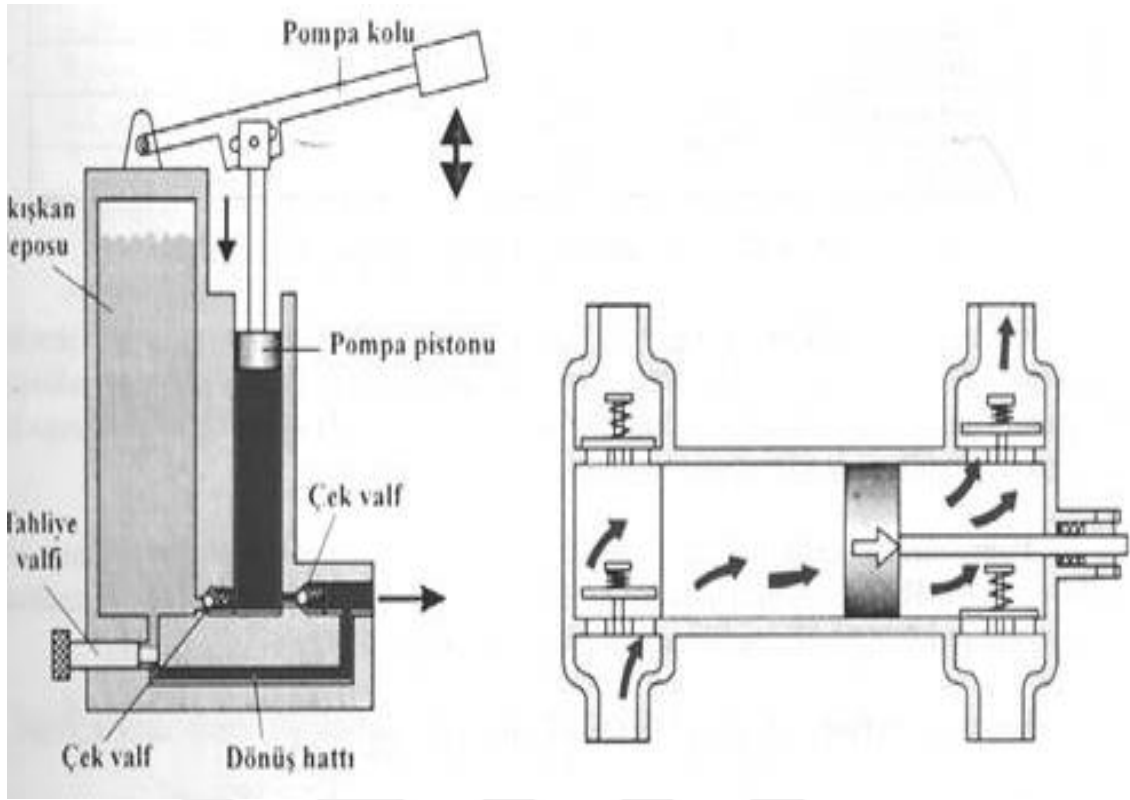
Çok kanatlı rüzgar türbinleri Şekil 1.1' de görüldüğü gibi kanatların kapladığı alan, rotor kanatları tarafından süpürülen alandan çok daha büyük bir paya sahip olduğundan düşük rüzgar hızı koşullarında daha iyi performans gösterebilir. Su pompalama uygulamalarına yönelik rüzgar türbinleri çoğu yatay ekselidir ve bir su pompasının çalışmasını başlatmak için gerekli olan yüksek başlangıç torkunu sağlayabilen çok kanatlı rotora sahiptir (Qasim & Samanci 2021).



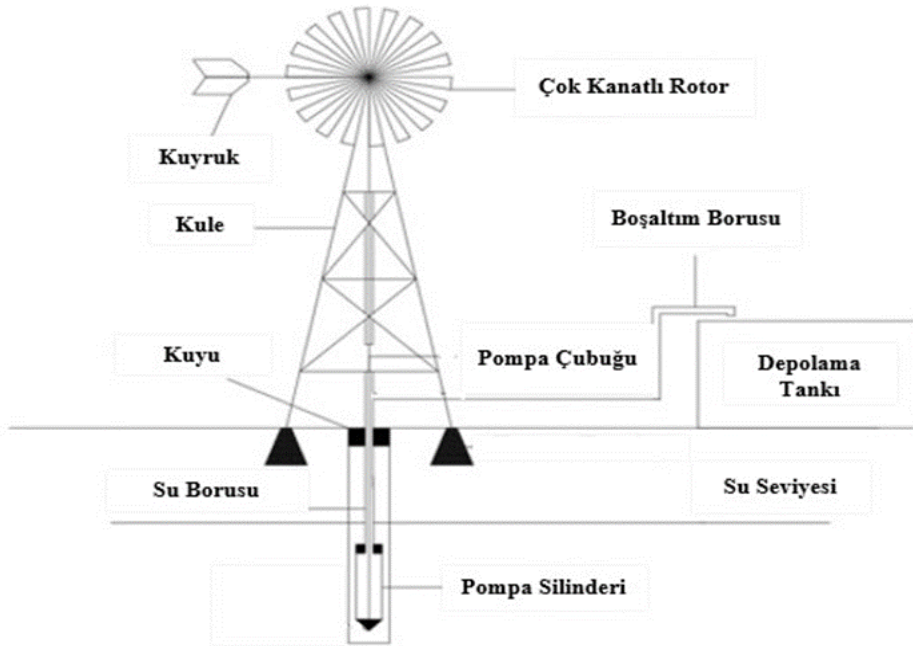
Şekil 1.1. Tipik bir çok kanatlı rüzgar türbini görseli

1.4. Su Pompaları

Rüzgar enerjisiyle çalışan pompa sistemlerinde kullanılan pompaların genellikle üç tipi bulunur ki bunlar; pistonlu, döner ve diyaframlı. Pistonlu ve döner pompalar pozitif deplasmanlı tiptedir. Pozitif deplasmanlı pompa, ölçülen miktarda suyun bir boşlukta tutulduğu, basıncının yükseltildiği ve ardından iletiildiği pompadır. Derin kuyulardan su pompalamak için normalde piston tipi pompa kullanılır. Pompa, doğrudan çok kanatlı rüzgar türbinin altında ve su seviyesinin altında bulunan borunun içine yerleştirilmiştir (Harleman 1977). Pistonlu su pompası çalışma prensibi Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.2. Tipik bir pistonlu su pompası çalışma prensibi şematik gösterimi



Şekil 1.3. Bir rüzgar pompası sisteminin bileşenleri ve çalışma şeması

1.5. Tezin Amacı

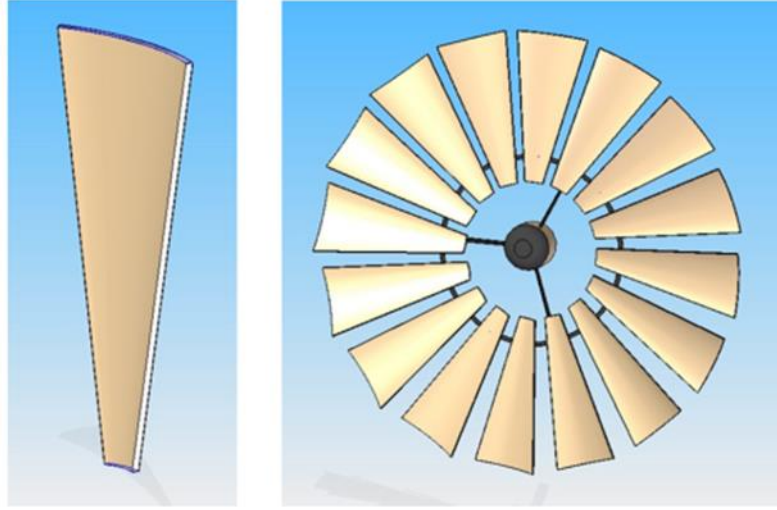
Ortalama bir çiftliğin günlük su ihtiyacını karşılayacak ekonomik, pratik, kurulumu ve işletmesi kolay bir rüzgar türbini sistemi tasarlamak amacıyla uygun kanat sayısı ve kanat geometrisinin belirlenmesi için deneysel ve nümerik analizler yapılmıştır.

1.6. Tezin Önemi

Rüzgar enerjisi; temiz, çevreyi kirletmeyen, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde erişilebilirliği ve kullanılma potansiyeli en yüksek olan türlerden birisidir. Fosil enerji kaynaklarının maliyetlerindeki artışla birlikte dünya, daha ucuz, çevreci ve yenilenebilir temiz enerji kullanımına yönelmektedir. Bu çalışmada; tarımsal üretim içerisinde en büyük giderlerden biri olan sulama maliyetini tümüyle ortadan kaldıracak, temiz, çevreci rüzgar enerjili bir sulama sisteminin ekonomik tasarımı yapılmıştır. Çalışma sonunda, özellikle elektriğe erişimi olmayan kırsal bölgelerde kullanılan fosil yakıtlı motor tahrikli su pompalarının yerine geçebilecek bir sistem tasarlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

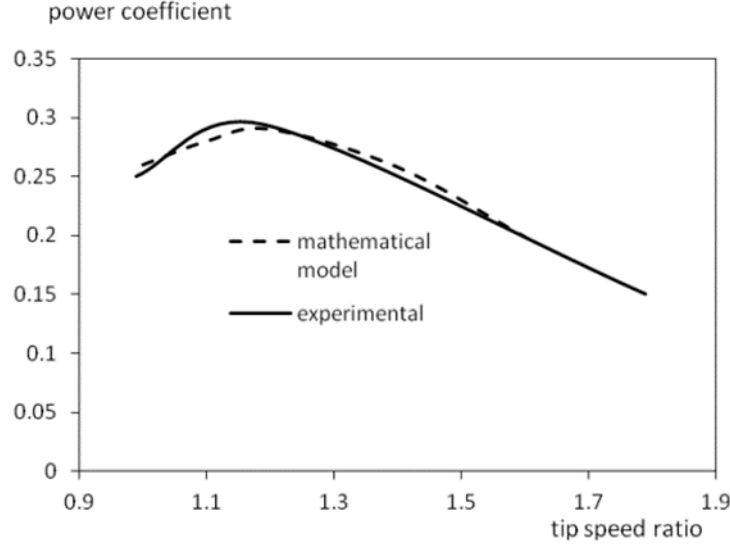
Aized ve diğerleri (2019), yapmış oldukları çalışmada 16 kanatlı bir rotor modeli için, ANSYS FLUENT' te sayısal yöntem kullanarak analizlerini yapmışlardır (Şekil 2.1). Bu çalışmada farklı şekil ve boyutlarda kanatlar denenmiş ve en uygun tasarım oluşturulmuştur. Çalışmalarında kök ve uç için sırasıyla 0.4 m ve 0.15 m giriş uzunlukları , eşit olarak değişen genişlikte kavisli, en iyi kanat olarak elde edilmiştir. Tasarımda kanadın uzunluğu 1.2 m ve rotor çapı 3m olarak alınmıştır. Modelleme çalışmaları 2.5-5 m/s aralığında 6 farklı rüzgar hızı için test edilmiştir. Çalışılan bölge için rüzgar hızının ortalama 3.5 m/s olduğu kabul edilmiştir. Çalışma, kanat girişi ile kanat dönüş eksenini arasındaki açı 23 ve 27 derece arasında olduğunda (rotor boyutu ne olursa olsun) rüzgar türbininin en fazla gücü ürettiğini göstermiştir. Bu gibi rüzgar türbinleri, sulama, hayvancılık ve evsel amaçlı kullanım için uygundur. Belirlenen ortalama rüzgar hızında 945 litre/saat su debisi sağlamaktadır.



Şekil 2.1. 16 kanatlı rotor model (Aized ve diğerleri 2019)

Keawsuntia (2013), çalışmasında 12 kanatlı ve 1 m çapında, 0,07 eğrilik oranı, 0,112 m giriş uzunluğu, 0,3 m kanat uzunluğuna sahip, 30 derece kanat ayar açısı, 1 mm kalınlıklı alüminyumdan oluşan bir rüzgar türbini modelini tasarlamıştır. Bu model rüzgar tüneli içinde 3 m/s referans rüzgar hızında test edilmiştir. Model 1.2 - 4.1 m/s aralığında 6 farklı rüzgar hızında test edilmiştir. Deneyde uç-hız oranı 1.18 alınmış, maksimum güç katsayısı yaklaşık 0,296' olarak

bulunmuştur. Keawsuntia yapılan deneysel çalışmayı matematiksel modelle karşılaştırmıştır (Şekil 2.2). Çalışma sonucunda, artan rüzgar hızlarında su debisinin arttığı fakat genel verimin düştüğü belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Keawsuntia deneysel ve matematiksel model güç katsayıları (Keawsuntia 2013)

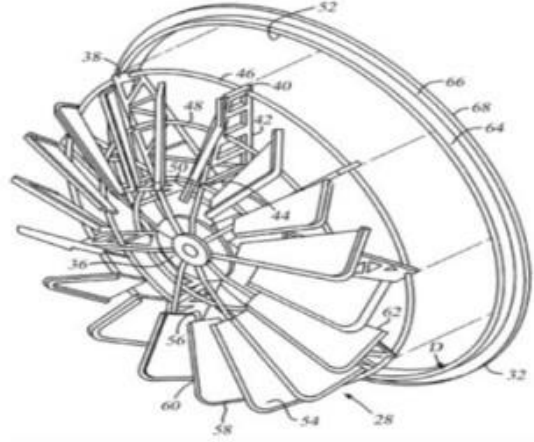
John ve diğerleri (2020), yapmış oldukları çalışmada 0.68 m çapında ve farklı kanat sayısında (3, 6, 12, ve 24 kanat) olmak üzere rüzgar türbini modelleri tasarlamışlardır. Bu çalışmada katılık oranı incelenmiş ve blokaj etkisi gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek blokaj rotor çıkışı üzerinde önemli derecede olumsuz etki oluşturmuştur, ayrıca kanat elemanı teorisinin (BET), düşük uç-hız oranları dışında doğru sonuç verdiği (torka göre) belirlenmiştir.

Odesola ve diğerleri (2017) araştırma makalesinde, Şekil 2.3' te görüldüğü gibi 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini ile çalışan bir rüzgar pompası prototipini hazırlamışlar ve bazı testler gerçekleştirmişler. Prototip rotor çapı 2.14 m, yüzey alanı 3.733 m² ve 0.654 katılık oranına sahiptir. Ayrıca ortalama rüzgar hızı, 16 m yükseklikte 2.5 m/s bulunmuştur. Her 20 dakikada bir aralıklarla, uç performans değerlendirme testi yapılmıştır. Deneyde ilk rüzgâr pompası, 0,8, 1.20, 1.45, 1.90 ve 2.10 m/s rüzgar hızlarında 4.48, 5.66, 6.61, 4.78 veya 7.81 litre/dakika su debisi elde edilmiştir. İkinci rüzgar pompası, 2.0, 1.80, 2.00, 2.30 ve 2.60 m/s rüzgar hızlarında , sırasıyla 3.42, 4.21, 5.44, 6.62 ve 8.82 litre/dakika ile elde edilmiştir. Üçüncü pompa, 1.80, 2.20, 31.2, 2.40 ve 2.52m/s hızlarında , 3.48, 5.10, 6.89, 7.81 ve 8.92 litre/dakika su debisi vermiştir.



Şekil 2.3. Odesolanın 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini ile güçlendirilmiş rüzgar pompasının prototipi (Odesola ve diğerleri 2017)

Al-Qdah ve diğerleri (2001) Ürdün'de kırsal alanlarda otonom olarak çalışan bir rüzgar pompasını incelemiştir. Normal çalışma koşulları altında aşağıdaki Şekil 2.4' te görüldüğü gibi roto-dinamik rüzgarla çalışan pompaların performansını test etmişler. Ayrıca bu çalışma rüzgarla çalışan roto-dinamik pompaların modellendiği, Mathew ve Pandey tarafından önerilen matematiksel bir modele dayanmaktadır. Spesifik hız, çap ve dişli oranının seçilen pompanın boyutuna etkileri araştırılmıştır. Sayısal simülasyon, Mathew ve Pandey tarafından önerilen matematiksel modele göre yapılmıştır. Farklı değerler için ortalama rüzgar hızları simüle edilmiş ve sonuçlar klasik rüzgar pompalarının performansı ile karşılaştırılmıştır. Roto-dinamik pompaların performansı, özellikle yüksek rüzgar hızlarında daha iyi bulunmuştur. 10 m/s' de seviyesindeki hızlarda rejeneratif pompa, verimliliği koruyabilir.

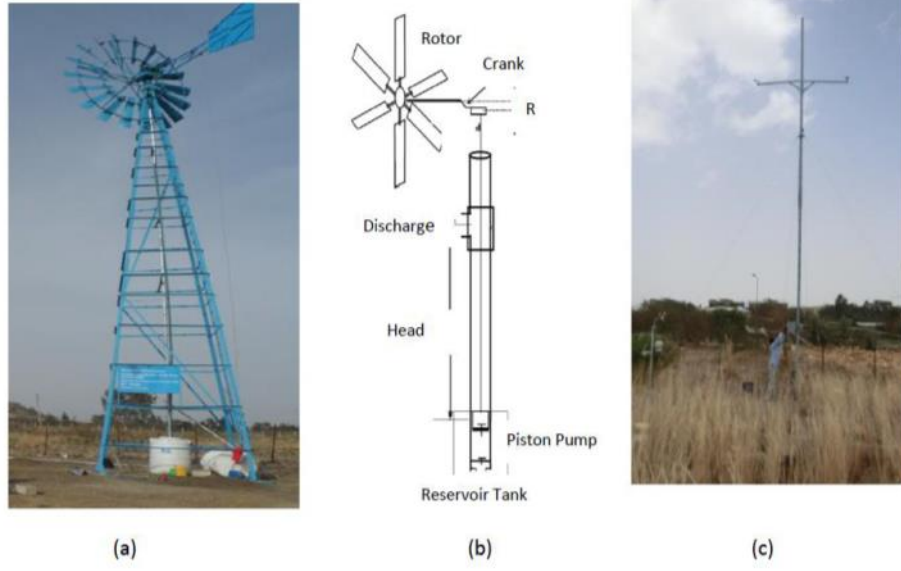


Şekil 2.4. Roto-dinamik rüzgarla çalışan bir pompanın şematik diyagramı (Al-Qdah ve diğerleri 2001)

Mamaghani ve diğerleri (2020), Şekil 2.5' te verilen gibi çok kanatlı yatay eksenli bir rüzgar türbini (HAWT) rotorunun etrafındaki, 3 boyutlu (3D) akış alanını ve performans özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ticari paketi aracılığıyla yapılmıştır. Kanatların etrafındaki sıkıştırılmaz Newton akışkanın modellemek için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılmıştır. 3 boyutlu (3D) akış davranışının değerlendirilmesi için (SST) $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu modelde patenti alınmış bir rüzgar türbininin basitleştirilmiş versiyonu kullanılmıştır. Bu versiyon çok kanatlı rotorlardan oluşturulmuştur. Çalışmada farklı rüzgar hızları için, farklı dönme hızlarına sahip rüzgar türbininin tork ve güç analizi yapılmıştır. Rotorun akış aşağısındaki dış iz bölgesinde akışın hızlandığı ve sonuç olarak daha büyük çaplı çok kanatlı bir rotorun ön rotorun arkasına yerleştirilmesi, hızlandırılmış iz akışından faydalanacaktır ve bu nedenle rüzgar türbinini toplam güç çıkışı daha iyi olacaktır.

Omer (2008), Bu çalışmada su pompalama amaçlı rüzgar türbini tasarımını yapmıştır. Bu çalışma Sudan' daki rüzgar potansiyelinden yararlanma olanaklarının altını çizdi ve yerel olarak rüzgar pompaları üretmenin uygulanabilirliğine odaklanmıştır. Çalışma üç temel araştırma üzerine kurulmuştur. İlk olarak Sudan için mevcut bölgedeki rüzgar hızların istatikselsel olarak analiz edilmiştir. Sonraki adımda mevcut bölgedeki rüzgar hızı seviyelerinin uzun vadeli ölçümlerine odaklanılmıştır. Bir sonraki adımda ise gerekli su debisi ve bu debi için gerekli güç gereksinimi hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda kırsal bölgeler için rüzgar pompalarının kullanılmasının ekonomik açıdan uygun olduğu tespit edilmiştir. İlk yatırım maliyeti fazla olmasına rağmen uygun debi ve bu debiye bağlı güç gereksinimi hesabı yapılarak kurulan su pompaları belli süre içinde maliyetini karşılayacağı belirlenmiştir.

Bayray ve diğerleri (2015), Şekil 2.5' de görüldüğü gibi 3.6 m rotor çapına, yerden 19 m yükseklikte ve 220 mm stroğa sahip pistonlu bir rüzgar pompası incelemişler. Prototip yerel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Rüzgar pompasının performansını tahmin etmek için rotor ve pistonlu pompanın birleşik verimine dayanan teorik model kullanılmıştır. Rüzgar hızı verileri 10 m yükseklikte alınan ölçümler kullanarak elde edilmiştir. Rüzgar pompasının su debisini tahmin etmek için teorik bir model oluşturulmuştur. Bu teorik modelde bir yıllık rüzgar hızı verileri kullanılarak, 8 m ve 12 m su kuyusu derinlikleri için günlük debinin 50 m^3 ve 30 m^3 civarında olduğu hesaplanmıştır. Bu model 55 mm ve 70 mm pompa stroğu boyutlarında deney sistemi hazırlanarak test edilmiştir. Test sonucunda teorik modelde hesaplanan günlük debinin fazla olduğu görülmüştür. 55 mm stroklu pompa, 8 m ve 12 m derinlikteki su kuyusu için debiler sırasıyla 20 ve 19 m^3 olarak verilmiştir. 70 mm stroklu pompa ile ise sırasıyla bu debiler 41 ve 30 m^3 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.6. Prototipin farklı görüntüleri: (a) rüzgar pompası prototipi, (b) test kurulumunun şematik diyagramı ve (c) rüzgar ölçüm direği (Bayray ve diğerleri 2015)

3. TEORİ ve TANIMLAR

3.1. Betz Teorisi

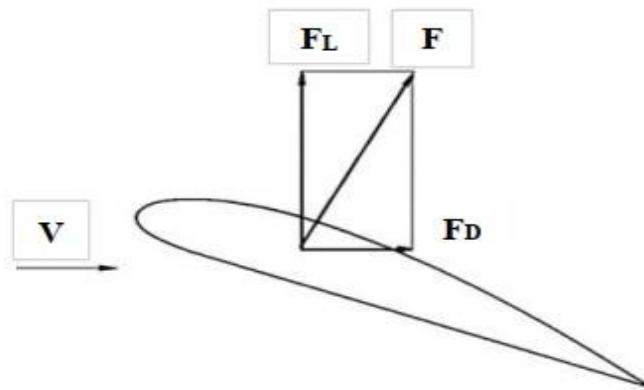
Bir rüzgar türbini rüzgar hareketinden gelen kinetik enerjinin tamamından faydalansaydı, akış durmuş hale gelirdi ve daha sonra rüzgar hızı sıfıra düşerdi. Rüzgar türbinin çıkışında hareket etmeyi durdurursa, akış durmuş hale gelir. Rüzgarın türbin içinde hareket etmesini sağlamak için, diğer tarafta sıfırdan büyük bir rüzgar hızı ile küçük de olsa bir rüzgar hareketi olmalıdır. Betz Teorisine göre, çıkıştaki rüzgar hızı, giriş hızının üçte biri değerine düşerse rüzgar enerjisinden elde edilebilecek maksimum güç miktarı (59.3%) elde edilir. Betz maksimum güç denklemi aşağıdaki gibi formülize edilmiştir;

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A_s V_R^3 \right) \quad (3.1)$$

Betz formülü, herhangi bir rüzgar akımının açık akışından elde edilebilecek maksimum gücün, rüzgarın sahip olduğu toplam kinetik enerjinin en fazla %59,25 ni teorik olarak elde edilebileceğini belirtir.

3.2. Dönen Kanat Üzerindeki Havanın Etkisi

Bir hava akımına profilli bir kanat yerleştirilirse, profilin iç kısmı yüksek basınç altında kalırken dışı daha düşük basınç altında olacaktır. Rüzgarın kanat üzerindeki etkisi, kaldırma F_L ve sürüklenme F_D kuvvetleri etkisinde olacağı Şekil 3.1 'de görülmektedir.



n

Şekil 3.1. Kaldırma ve Sürüklenme kuvvetleri

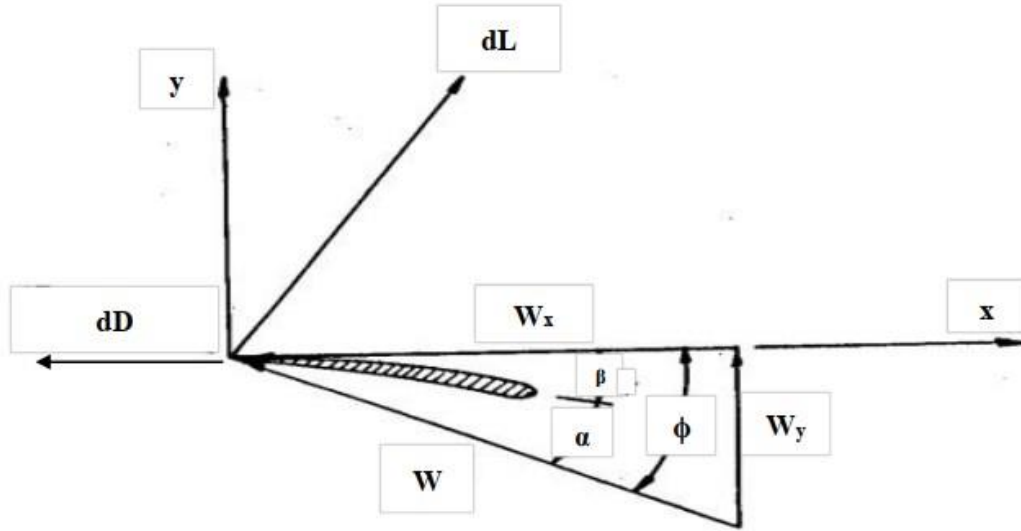
Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir;

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L \quad (3.2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D \quad (3.3)$$

3.3. Kanat Elemanı Teorisi

Kanat elemanı teorisi ile diferansiyel bir kanat elemanına etkiyen kuvvetler hesaplanabilir. Ardından, tüm rotorun performansını belirlemek için kanadın uzunluğu boyunca entegrasyon gerçekleştirilir. Her bir kanat boyunca bitişik kanat elemanları arasında herhangi bir müdahale yoktur. Bir kanat elemanına etki eden kuvvetler, yalnızca elemanın kesit profilinin kaldırma ve sürüklenme özelliklerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.2. Bir kanat elemanına etki eden kuvvetler ve açıları

Kanat elemanlarına etki eden aerodinamik kuvvet bileşenleri, Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi ortaya çıkan hız vektörüne dik olan kaldırma kuvveti dL ve ortaya çıkan hız vektörü yönünde hareket eden sürüklenme kuvveti dD dir.

3.4. Rüzgar Enerjisinden Elde Edilen Güç (P)

Rüzgar enerjisi, hareket halindeki havanın kinetik enerjisidir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç;

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_s V^3 C_p \quad (3.4)$$

3.5. Tork (T)

Su pompalamak için kullanılan rüzgar türbinlerinde elde edilen tork miktarı aşağıda verilmektedir;

$$T = \frac{1}{2} \rho A_s R V^2 C_T \quad (3.5)$$

3.6. Boyutsuz Katsayılar

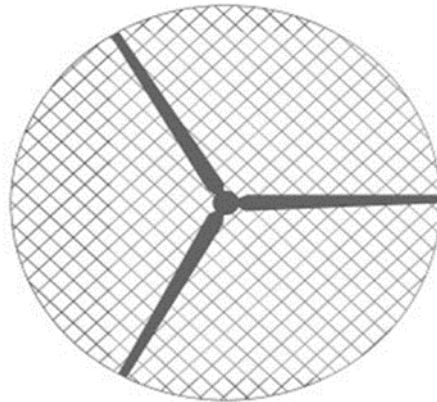
Farklı rüzgar türbin türlerini karşılaştırmak için boyutsuz katsayıları tanımlamakta fayda vardır. Bu boyutsuz sayıları, mekanik yükleri ve genellikle önceden bilinmeyen diğer çalışma parametrelerini hesaplamak için de yararlıdır.

3.6.1. Katılık Oranı (σ)

Katılık katsayısı, tüm kanatların toplam alanı ile göbek (Şekil 3.3 'te düz siyah renkli alan) alanının, rotor tarafından süpürülen alana (kareli alana) oranı olarak tanımlanır.

$$\sigma = \frac{N A_B}{A_s} \quad (3.6)$$

$$A_b = \frac{1}{2} L (A+B) \quad (3.7)$$



Şekil 3.3. Katılık katsayısının grafik gösterimi

3.6.2. Uç Hızı Oranı (λ)

Uç hız oranı, radyan/saniye dönerken R yarıçapındaki rüzgar türbini kanat ucunun rüzgar hızına oranıdır, rotor çapı, D ve devir sayısı, N ile aşağıdaki şekilde formülize edilir;

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} = \frac{\pi DN}{60V} \quad (3.8)$$

3.6.3. Reynold Sayısı (Re)

Küçük rüzgar türbinlerinin tasarımı için, özellikle zayıf rüzgarların olduğu yerlerde temel bir parametredir, çünkü kanat profillerinin aerodinamik performansları belirli bir Reynolds sayısının altına düşer. Reynold sayısı Re , aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (3.9)$$

3.6.4. Güç Katsayısı (C_P)

Güç katsayısı, rüzgar türbinin gerçek güç çıkışının (P) rüzgarın teorik gücüne ($P_{rüzgar}$) oranıdır;

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_s V^3} \quad (3.10)$$

3.6.5. Tork Katsayısı (C_T)

Gerçek Motor torkunun, motorun teorik torkuna oranıdır;

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_s R V^2} \quad (3.11)$$

3.6.6. Su Pompalama Gücü (P_{Pompa})

Pompalarda su gücü aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır;

$$P_m = P_{pompa} = \rho_{su} g H Q \eta_{pompa} \quad (3.12)$$

Pompa kayıpları, sistem kayıplarının tahmininde dikkate alınması gereken en önemli bir faktördür. Günümüzde bronz veya pirinçten yapılmış, cilalı delikli ve deri contalı pompa silindiri daha verimli olarak kabul edilmektedir. Bu tasarım uzun ömürlüdür ve zamanla çok daha az

sızıntıya sahiptir. Ancak pompadaki sürtünme kayıpları çok önemlidir. Böylece en iyi tasarım ve mükemmel malzeme ile pompanın toplam verimi %75 olarak alınabilir (Aized ve diğerleri 2019).

3.7. Modelleme

Deneysel çalışmalarda, zamandan ve paradan tasarruf etmek için incelemeler, tam ölçekli prototip yerine geometrik ölçekli bir model üzerinde gerçekleştirilir. Geometrik benzerlik model, prototip ile aynı şekle sahip olmalıdır, ancak sabit ölçek faktörü ile ölçeklenebilir. Çalışmamızda rüzgar tüneli içinde yapılacak olan incelemelerde dinamik modelleme için Reynold sayıların eşit olması şartı aranır.

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p} \quad (3.13)$$

Çalışmamızda 1/10 ölçek kullanarak modellenmiş rotorların çapı 0.24 m alınmıştır. Bu durumda dinamik benzerlik için Rüzgar tüneli içinde rüzgar hızını 10 kat büyütmemiz gerekirken, elverişli olmayan koşullar nedeniyle gerçek rüzgar hızları kullanılmıştır.

3.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Temelleri

Analizde kesme gerilmesi taşınımı (SST) $k - \omega$ modeli kullanılmıştır. Duvarın yakınında bulunan $k - \omega$ modelinin sağlam ve doğru formülasyonunu etkili bir şekilde harmanlamak için geliştirilmiştir. Uzak alandaki $k - \epsilon$ modelinin serbest akış bağımsızlığı. Bunu başarmak için $k - \epsilon$ modeli bir $k - \omega$ formülüne dönüştürülür. SST $k - \omega$ modeli, standart $k - \omega$ modeline benzer, ancak bazı iyileştirmeleri içerir, Standart $k - \omega$ modeli ve dönüştürülmüş $k - \epsilon$ modelinin her ikisi de bir karıştırma fonksiyonu ile çarpılır ve her iki model birlikte toplanır. Karıştırma işlevi, standart $k - \omega$ modelini etkinleştiren duvara yakın bölgede ve dönüştürülmüş $k - \epsilon$ modelini etkinleştiren yüzeyden sıfır uzakta olacak şekilde tasarlanmıştır. SST modeli, $k - \omega$ denkleminde sönümlü bir çapraz difüzyon türevi terimini içerir.

Türbülans viskozitesinin tanımı, türbülanslı kayma gerilmesinin taşınmasını hesaba katacak şekilde değiştirilir. Ayrıca modelleme sabitleri farklıdır. Bu özellikler, SST $k - \omega$ modelini standart $k - \omega$ modelinden daha geniş bir akış sınıfı (örneğin, ters basınç gradyan akışları, kanat profilleri, transonik şok dalgaları) için daha doğru ve güvenilir kılar. Diğer modifikasyonlar, ω denklemine

bir çapraz difüzyon teriminin eklenmesini ve model denklemlerinin hem yakın duvar hem de uzak alan bölgelerinde uygun şekilde davranmasını sağlamak için bir karıştırma fonksiyonunu içerir. Basınca dayalı çözücü, akış probleminizi ayrı veya birleşik bir şekilde çözmeye olanak tanır. ANSYS FLUENT, beş basınç-hız eşleştirme algoritması arasından seçim yapma seçeneği sunar: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled ve (yinelemeli olmayan zaman ilerleme şemasını (NITA) kullanan kararsız akışlar için) Fraksiyonel Adım (FSM). SIMPLE algoritması, kütle korunumunu zorlamak ve basınç alanını elde etmek için hız ve basınç düzeltmeleri arasında bir ilişki kullanır. Türbülans akışı olduğu için SIMPLE algoritma kullanılmıştır (Versteegand ve Malalasekera 2007).



4. MATERYAL ve YÖNTEM

Konya şehrinde ortalama bir çiftliğin su ihtiyacını karşılamak için farklı rüzgar hızlarında (3, 4, 5, 7.5, ve 10 m/s) ve 12, 24 ve 36 adet olmak üzere üç farklı kanat sayısına sahip birer rüzgar türbini tasarımı yapılarak bunun deneysel ve nümerik performansı incelenmiştir. Deneysel çalışma Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık fakültesi D blokta bulunan enerji sistemleri laboratuvarındaki rüzgar tüneline yapılmıştır. Nümerik çalışma ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak ANSYS programında yapılmıştır.

4.1. Materyal

Çok kanatlı rüzgar türbinlerinin rotor çapı Ek-2' de literatür özet tablosunda görüldüğü gibi genelde (1.2m - 6m) aralığında kullanılmaktadır. Konya ilinde su derinlikleri 60 – 120 metre arasında olduğu için çalışmamızda su derinliği 80 metre olarak seçilmiştir. Konya şartlarında, 80m basma yüksekliğinde 5m/s rüzgar hızında günlük 8-10 ton su ihtiyacını karşılayacak Çizelge 4.1' de görüldüğü gibi rotor çapı 2.4m olarak seçilmiştir. Deney maliyetini azaltmak için rüzgar türbini modelleri 1/10 ölçek oranında oluşturulan, dolayısıyla 2.4 m türbin yerine 24 cm rüzgar türbini modelini deneysel olarak test edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kanat 1.5 mm kalınlığa sahiptir. Türbin tasarımında çok kanatlı, düşük hızlı rüzgar türbinleri için torku maksimize edecek, literatürde görüldüğü gibi uç hız oranları genellikle 1-1.5 arasında seçilmiştir. Biz bu çalışmamızda uç hız oranını $\lambda=1$ olarak seçtik. Kanat uzunluğu boyunca bükülme açılarının tespiti için Çizelge 4.2' de görüldüğü gibi kanat uzunluğunu kanat kökü ve kanat ucu arasında 5 parçaya eşit aralıkta bölünmek suretiyle her bir bölümdeki teğetsel hızlar ve kanat giriş-çıkış açıları Çizelge 4.2' de sunulmuştur. Elde edilen bu açılarda da kanat kesitlerindeki kanat kökünden başlayıp kanat ucuna kadar olan 5 farklı kanat kesiti için hız üçgenleri giriş ve çıkış için oluşturulmuş ve Şekil 4.1' de sunulmuştur.

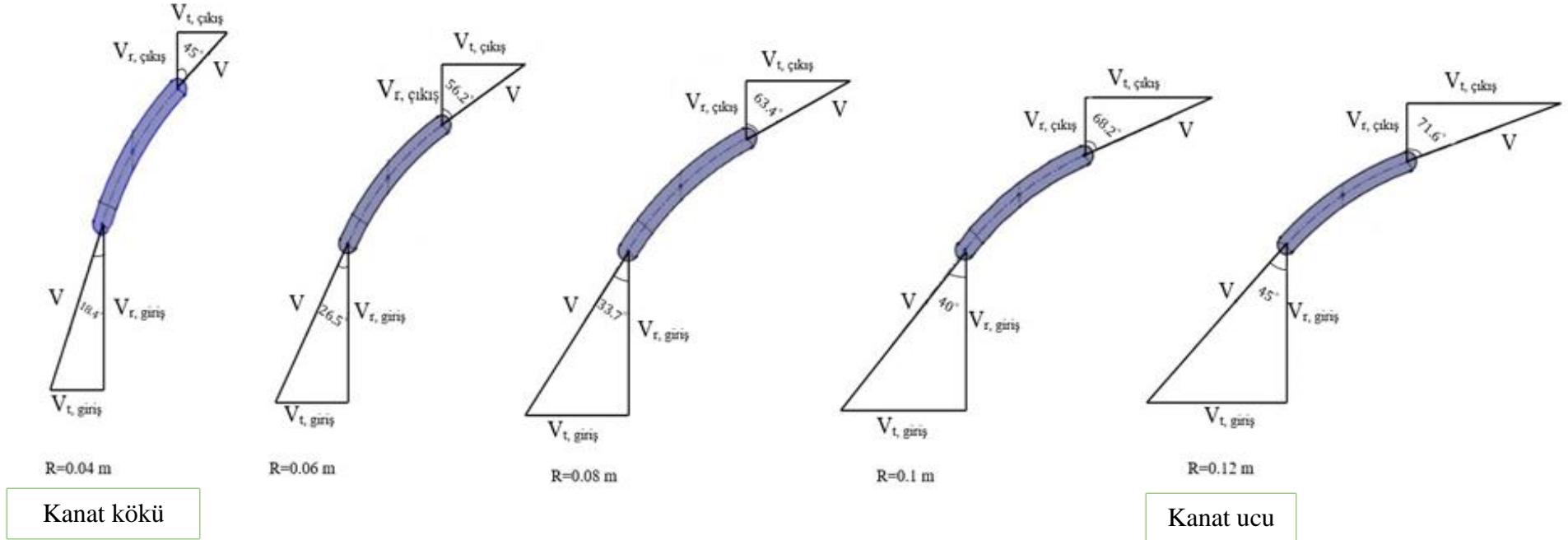
Çizelge 4.1. Farklı basma yükseklikleri için, farklı çaplarda ve farklı rüzgar hızlarında elde edilecek türbin gücü ve pompa debileri

Rotor çapı, D (cm)	Rotor alanı, A_r (m ²)	Derinlik, H (m)	Rüzgar hızları, V_r (m/s)														
			3			4			5			7.5			10		
			Teorik güç* (W)	Pompa gücü** (W)	Debi, Q (ton/gün)	Teorik güç* (W)	Pompa gücü** (W)	Debi, Q (ton/gün)	Teorik güç* (W)	Pompa gücü** (W)	Debi, Q (ton/gün)	Teorik güç* (W)	Pompa gücü** (W)	Debi, Q (ton/gün)	Teorik güç* (W)	Pompa gücü** (W)	Debi, Q (ton/gün)
120	1.13	20	5.6	4.2	1.85	13.2	9.9	4.4	26	19.5	8.6	87.7	65.8	29.0	208.0	156	69
		40	5.6	4.2	0.93	13.2	9.9	2.2	26	19.5	4.3	87.7	65.8	14.5	208.0	156	34
		60	5.6	4.2	0.62	13.2	9.9	1.5	26	19.5	2.9	87.7	65.8	9.7	208.0	156	23
		80	5.6	4.2	0.46	13.2	9.9	1.1	26	19.5	2.1	87.7	65.8	7.2	208.0	156	17
		100	5.6	4.2	0.37	13.2	9.9	0.9	26	19.5	1.7	87.7	65.8	5.8	208.0	156	14
240	4.52	20	22.4	16.8	7.40	53.3	40.0	17.6	103	77.0	33.9	350.9	263.2	115.9	830.7	623	274
		40	22.4	16.8	3.70	53.3	40.0	8.8	103	77.0	17.0	350.9	263.2	58.0	830.7	623	137
		60	22.4	16.8	2.47	53.3	40.0	5.9	103	77.0	11.3	350.9	263.2	38.6	830.7	623	91
		80	22.4	16.8	1.85	53.3	40.0	4.4	103	77.0	8.5	350.9	263.2	29.0	830.7	623	69
		100	22.4	16.8	1.48	53.3	40.0	3.5	103	77.0	6.8	350.9	263.2	23.2	830.7	623	55
360	10.17	20	50.0	37.5	16.51	118.7	89.0	39.2	233	175.0	77.1	789.3	592.0	260.7	1871.3	1404	618
		40	50.0	37.5	8.26	118.7	89.0	19.6	233	175.0	38.5	789.3	592.0	130.3	1871.3	1404	309
		60	50.0	37.5	5.50	118.7	89.0	13.1	233	175.0	25.7	789.3	592.0	86.9	1871.3	1404	206
		80	50.0	37.5	4.13	118.7	89.0	9.8	233	175.0	19.3	789.3	592.0	65.2	1871.3	1404	155
		100	50.0	37.5	3.30	118.7	89.0	7.8	233	175.0	15.4	789.3	592.0	52.1	1871.3	1404	124
480	18.10	20	89.7	67.3	29.64	213.1	159.8	70.4	416	312.0	137.4	1405.5	1054.1	464.2	3330.7	2498	1100
		40	89.7	67.3	14.82	213.1	159.8	35.2	416	312.0	68.7	1405.5	1054.1	232.1	3330.7	2498	550
		60	89.7	67.3	9.88	213.1	159.8	23.5	416	312.0	45.8	1405.5	1054.1	154.7	3330.7	2498	367
		80	89.7	67.3	7.41	213.1	159.8	17.6	416	312.0	34.3	1405.5	1054.1	116.0	3330.7	2498	275
		100	89.7	67.3	5.93	213.1	159.8	14.1	416	312.0	27.5	1405.5	1054.1	92.8	3330.7	2498	220
600	28.26	20	140.0	105.0	46.24	332.0	249.0	109.7	649	487.0	214.5	2194.7	1646.0	724.8	5200.0	3900	1717
		40	140.0	105.0	23.12	332.0	249.0	54.8	649	487.0	107.2	2194.7	1646.0	362.4	5200.0	3900	859
		60	140.0	105.0	15.41	332.0	249.0	36.6	649	487.0	71.5	2194.7	1646.0	241.6	5200.0	3900	572
		80	140.0	105.0	11.56	332.0	249.0	27.4	649	487.0	53.6	2194.7	1646.0	181.2	5200.0	3900	429
		100	140.0	105.0	9.25	332.0	249.0	21.9	649	487.0	42.9	2194.7	1646.0	145.0	5200.0	3900	343

* $C_P = 0.3$ (Güç katsayısı)** $\eta_{toplam} = \eta_{pompa} \times \eta_{boru kayıpları} \times \eta_{mekanik} = 0.75$

Çizelge 4.2. Kanat kesitlerinin rüzgar giriş-çıkış hızları ve açıları

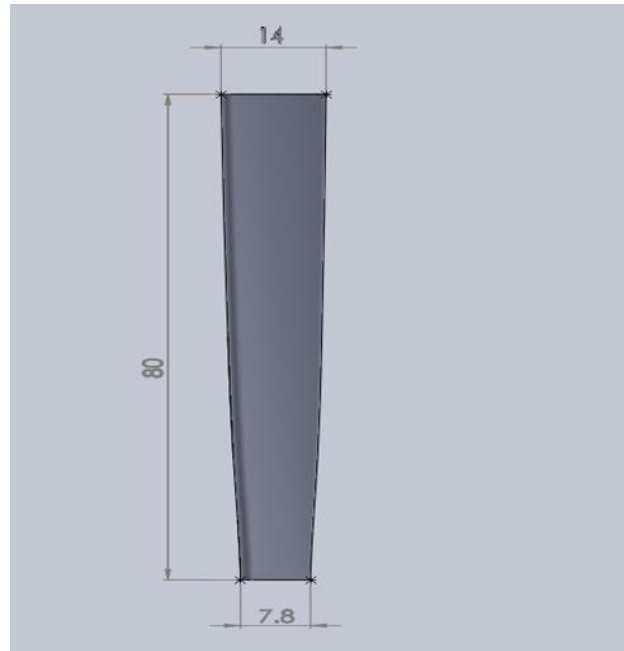
Kanat Kesitleri	Rotor yarıçapı R (m)	Açısal hız ω (rad/s)	Rüzgar giriş hızı $V_{r, giriş}$ (m/s)	Rüzgar çıkış hızı $V_{r, çıkış}$ (m/s)	Teğetsel hız V_t (m/s)	Rüzgar giriş açısı (α_1°)	Rüzgar çıkış açısı (α_2°)
1. Kanat kökü	0.04	33.3	4	1.3	1.3	18.4	45.0
2. Ara kesit	0.06	33.3	4	1.3	1.9	26.5	56.2
3. Ara kesit	0.08	33.3	4	1.3	2.6	33.7	63.4
4. Ara kesit	0.10	33.3	4	1.3	3.3	40.0	68.2
5. Kanat ucu	0.12	33.3	4	1.3	4.0	45.0	71.6

Şekil 4.1. Kanat kesitleri için kökten başlayarak kanat ucuna kadar rüzgar giriş ve çıkış açıları (sırasıyla $R=0.04$ m, 0.06 m, 0.08 m, 0.1 m ve 0.12 m için)

Yapılan önceki çalışmalara göre, su pompalama amaçlı rüzgar türbinlerinde kanat sayısı genellikle 12- 36 aralığında olduğu Ek-2' de literatür özeti tablosunda rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında 12, 24 ve 36 adet olmak üzere üç farklı kanat sayısına sahip rüzgar türbini modelleri incelenmiştir. Bu modeller için katılık oranı, kanatların ön tarafından görülen alanı Şekil 4.3' de görüldüğü gibi SolidWorks programı üzerinden farklı kanat kord uzunluğu 14, 16, 18 ve 20cm için kord uzunluk değerleri için, kanat alanı hesaplanmış ve katılık oranı değerleri Çizelge 4.3' te verilmiştir. Tüm deneysel ve nümerik çalışmalarda hesaplamalar tek bir kord uzunluğuna (14mm) göre yapılmıştır. Çizelge 4.3 ten görüleceği üzere, 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modelleri için katılık oranları sırasıyla 0.22, 0.41 ve 0.62 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Farklı kord uzunlukları için farklı kanat sayılarındaki katılık oranları

Kord uzunluğu (mm)	Kanat alanı (cm ²)	Rotor Katılık Oranları σ		
		Kanat Sayıları		
		12 Kanat	24 Kanat	36 Kanat
20	11.0	0.29	0.59	0.88
18	10.0	0.26	0.53	0.79
16	9.0	0.23	0.46	0.72
14	7.8	0.22	0.41	0.62



Şekil 4.2. Model kanadın ön taraftan görülen alanı

Kanat profilleri ve rüzgar türbini rotor modelleri SolidWorks programı ile oluşturulmuş ve üç boyutlu yazıcı kullanılarak imal edilmiştir (Şekil 4.3).

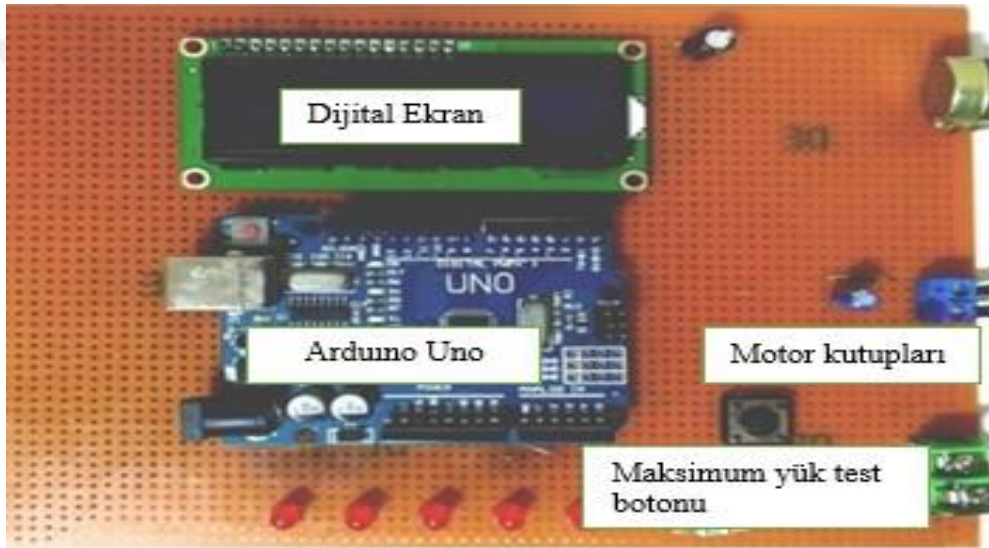


Şekil 4.3. Üç boyutlu yazıcı ile basılan rüzgar türbini modelleri (12, 24, ve 36 kanat sayılı)

Rotor arkasında kullanılan jeneratörün voltajı 12v ve maksimum akım gücü 1.5 amperdir. Jeneratör seçimi rüzgar türbini modelinin üretebileceği maksimum güce göre seçilmiştir. Rotor süpürme alanı $0,045 \text{ m}^2$ için maksimum rüzgar hızı 10 m/s olduğu zaman üretilen güç 13 W değerindedir. Şekil 4.4' te jeneratör görülmektedir. Ölçüm cihazı Arduino elektronik kart kullanılarak tasarlanmış (Şekil 4.5) ve bilgisayar tarafından akım, gerilim ve dönüş hızını ölçecek şekilde programlanmış olup, sayılar cihaz üzerindeki dijital ekrandan alınarak güç hesaplanmıştır. Ek-1' de programlama kodları gösterilmektedir. Frekans konvertörü ile rüzgar tünelinin fan devri artırılarak tünel içindeki rüzgar hızları istenildiği gibi ayarlanmıştır. Daha sonra elde edilen akım ve voltaj değerleri ölçüm cihazının ekranından okunmuştur. Dinamo voltajı 12v ve amper gücü (0.5-1.5) amper aralığında belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan jeneratör görseli

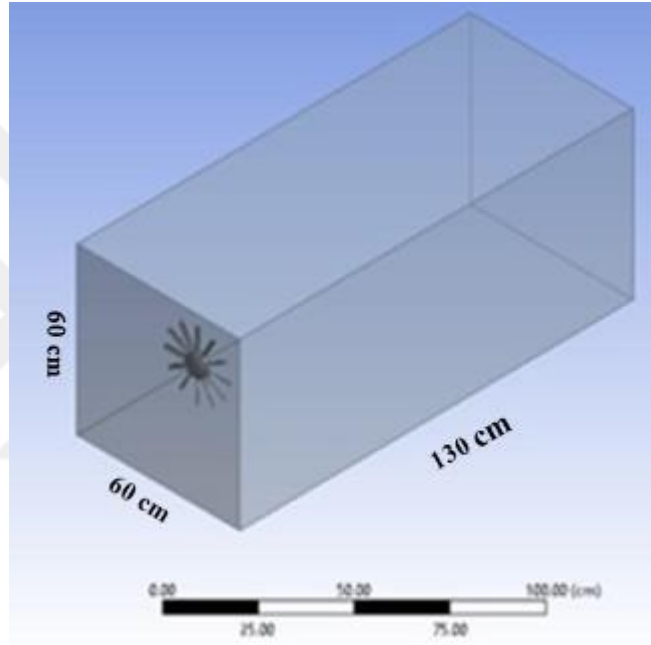


Şekil 4.5. Deneyde kullanılan akım, voltaj ve devir sayısı ölçümünü yapan elektronik kart

Rüzgar tünelinin test kabini boyutları ise uzunluk ve genişliği 60 cm x 60 cm kare ve boyu 1.3 m uzunluğundadır. Modellerin test alanındaki konumu girişten 15 cm mesafede konumlandırılmıştır. Şekil 4.6' da rüzgar tüneli ve test kabini görülmektedir. Nümerik analizler ANSYS FLUENT programında yapılmıştır. Modellerin CAD çizimleri Şekil 4.7' de görülmektedir. Nümerik ve deneysel çalışmada kullanılan veriler Çizelge 4.4' te verilmiştir.



Şekil 4.6. Rüzgar tüneli ve test kabini



Şekil 4.7. ANSYS FLUENT programında çizilmiş kontrol hacmi

Çizelge 4.4. Deneysel ve Nümerik çalışmada kullanılan veriler

Özellikler	Değer
Rüzgar hızı (m/s)	3-4-5-7.5-10
Açısal hız (rad/s)	25-33.3-41.6-62.5-83.3
Rotor çapı (m)	0.24
Kanat uzunluğu (m)	0.08
Kord uzunluğu (m)	0.014
Kanat sayısı	12 - 24 - 36
Katılık oranı	0.2 - 0.41-0.62
Uc hız oranı	1
Dinamo voltajı (volt)	12
Dinamo Amperi	0.5-1.5
Pompa kafası (m)	80
Günlük Debi ihtiyacı (litre/gün)	8000-10000

4.2. Yöntem

Konya bölgesi için (20, 40, 60, 80 ve 100 m) farklı yüksekliklere bağlı (1.20, 2.40, 3.60, 4.80 ve 6 m) türbin çaplarında ve farklı rüzgar hızları (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) için elde edebilecek türbin gücü ve verim faktörünü de girmek suretiyle motor ve pompa gücü değerleri tespit edilmiştir. Buna göre Konya bölgesi için ortalama 80 m su derinliği ve günlük 8-10 ton su ihtiyacı için 240 cm türbin çapına karar verilmiştir. Daha sonra, deneysel çalışma pahalı olacağı için 1/10 ölçek skalasında küçültülerek 240 cm yerine 24 cm çapında model türbinimiz oluşturulmuştur. 3 parametre olarak 12, 24 ve 36 kanat sayılı rüzgar türbinlerinin hangisi daha verimli olduğunu tespit etmek için nümerik ve deneysel analizler yapılmış ve daha sonra deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen tork, güç ve güç katsayısı değerleri grafikler halinde sunulmuş yorumlanmıştır.

4.2.1. Deneysel Çalışma Yöntemi

Deneysel çalışmalar, Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi D-blokta bulunan enerji sistemleri laboratuvarındaki rüzgar tüneline yapılmıştır. Rüzgar tüneline bulunan yan pencere açılarak 1/10 ölçekte üretilmiş modeller, önce 12 kanatlı sonra 24 kanatlı ve en son 36 kanatlı test kabini içine monte edilmek suretiyle farklı rüzgar hızlarında (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s), performansı, jeneratör ürettiği akım ve voltaj değerleri ölçülerek ve bu değerler çarpılarak anlık üretilen güç değerleri ve elde edilen tork, güç ve güç katsayısı grafikleri deneysel çalışma bölümünde sunulmuştur.

4.2.2. Nümerik Çalışma Yöntemi

Deneysel çalışma sonuçlarını karşılaştırmak için nümerik analizler' de yapılmıştır. Bu analizler ANSYS FLUENT programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneline test alanı aynı boyutlarda çizilip içinde ön taraftan 15 cm ileride modellerin CAD çizimleri yerleştirilmiştir. 12, 24 ve 36 kanat sayılı her bir rüzgar türbini rotoruna sırasıyla (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) uygulanarak hız ve basınç dağılım profillerindeki maksimum ve minimum hız ve basınç değerleri okunmuştur. Farklı rüzgar hızlarında türbin yukarı ve aşağı akımındaki hız ve basınç dağılımı Şekil 5.7-5.16' da sunulmuştur. Daha sonra son nümerik analizde elde edilen tork, güç ve güç katsayısı grafikleri deneysel çalışma için Şekil 5.19' da sunulmuştur.

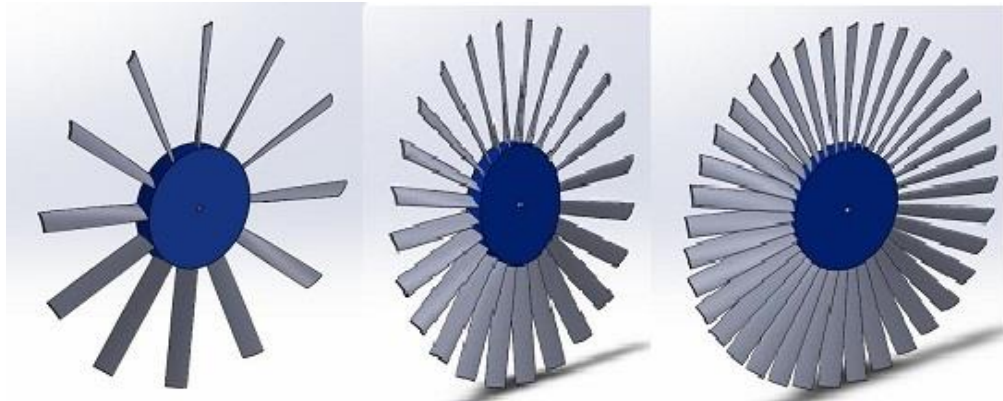
5. NÜMERİK ve DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Nümerik Çalışma

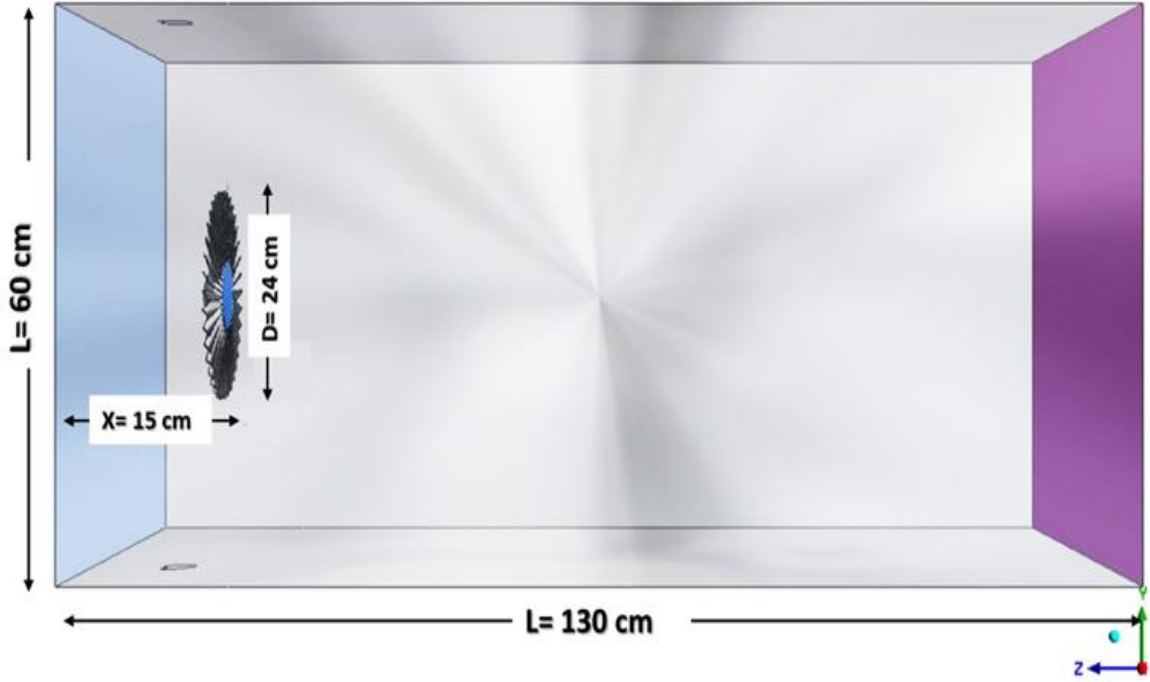
Çok kanatlı rüzgar türbini modellerinin CFD simülasyonu ANSYS Fluent 2021 R2 Yazılımı kullanılarak yapılmıştır. ANSYS Fluent, akışkan akışını, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve daha fazlasını modellemek için kullanılan genel amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımıdır. Fluent, tek bir pencere iş akışı içinde CFD sürecini ön işlemekten son işlemeye kadar kolaylaştıran modern, kullanıcı dostu bir arayüz sunar. ANSYS kapsamında rüzgar türbini simülasyon çözümlerinde sunar. Entegre bir ortamda, ANSYS multifizik simülasyonları, rüzgar türbini mühendislerinin kanat ve rotor aerodinamiğini ve akustiğini ele almalarını sağlar (Anonim 2022). Nümerik çalışma adımları aşağıda; kontrol hacminin oluşturulması, ağ yapısının oluşturulması, çözücü seçimi, türbülans modelinin seçilmesi, akış özellikleri, sınır koşulları ve çözüm yöntemi seçimi özet bir şekilde verilmektedir.

5.1.1. Kontrol Hacminin Oluşturulması

Üç farklı 12, 24 ve 36 kanat sayılı rüzgar türbini modelleri, SolidWorks programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 5.1). Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar tüneline aynı boyutlarda ANSYS programı içinde çizilerek, içine üç rüzgar türbini modelini IGS dosya tipi olarak rotorlar sırasıyla aktarıldı, aşağıdaki Şekil 5.2' de kontrol hacmi ve içinde rotor konumu görülmektedir.



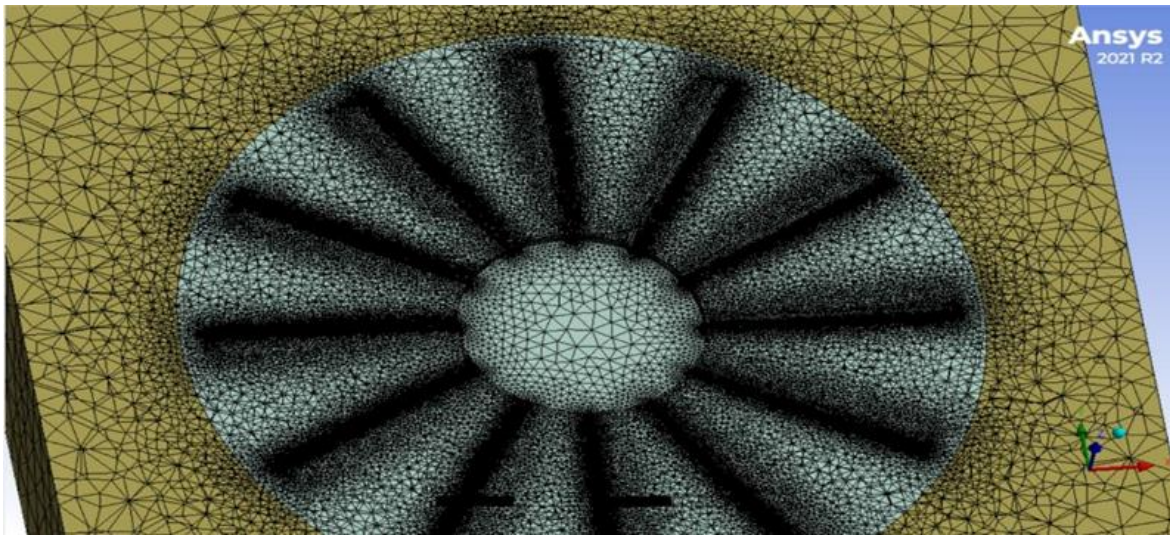
Şekil 5.1. Solidworks programında çizilmiş 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modelleri



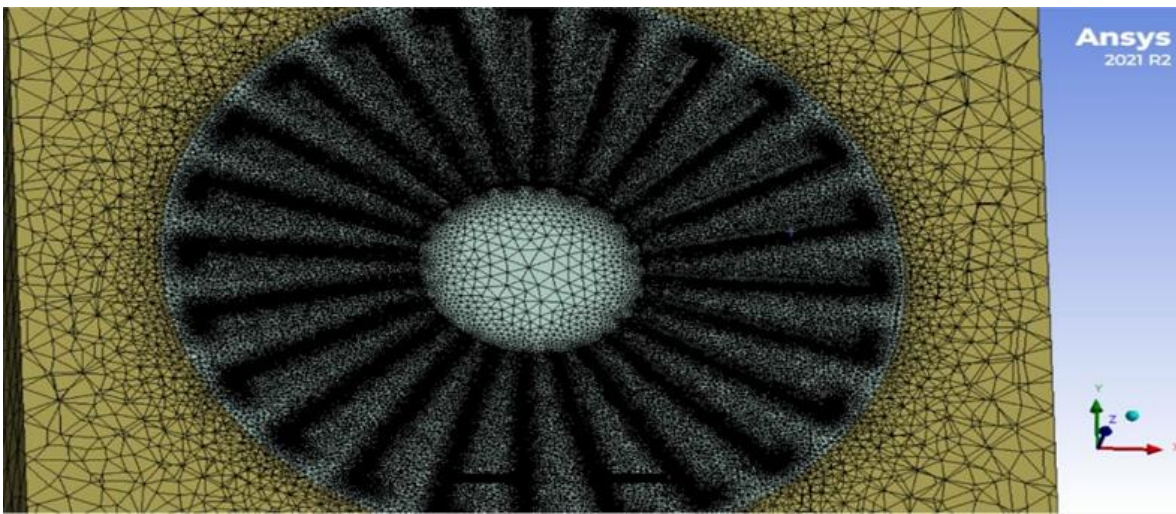
Şekil 5.2. ANSYS programında kontrol hacmi ve içinde rüzgar türbini modelinin konumu

5.1.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

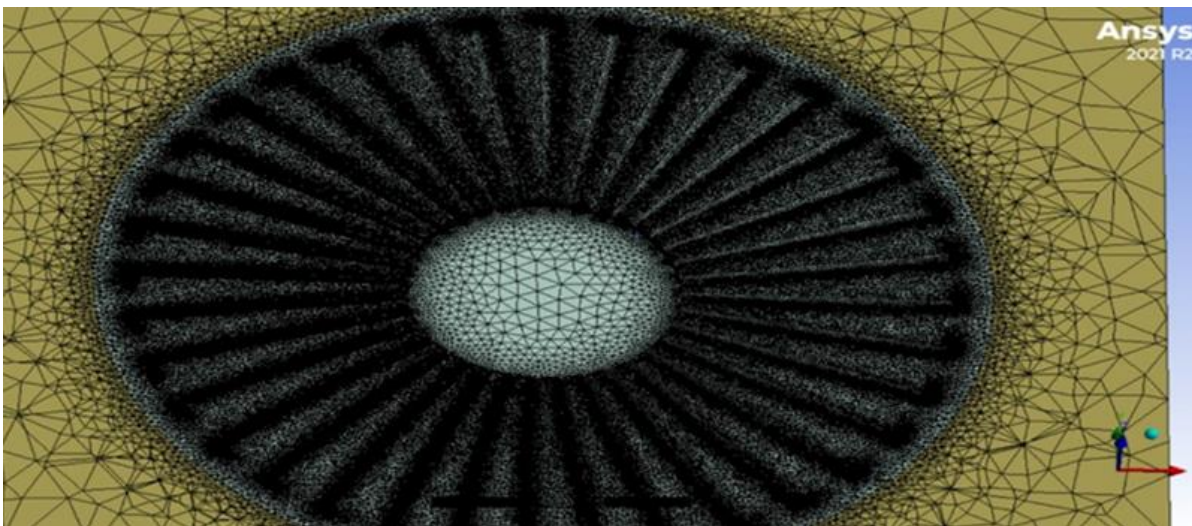
RANS ve türbülans modelinden çözümlenebilmesi için gelen ek taşınım denklemlerinin sayısal olarak hesaplama bölgesinin ayrıklaştırılması gerekir (Çankaya 2021). Çözmek için kullanıldığından modele ağ oluşturma stratejisini uygulamaktır. ANSYS içindeki yerleşik ağ oluşturan (Mesher), tüm alanları boyutlandırarak ve türbin kanatları gibi karmaşık şekillerin etrafındaki ağı yoğunlaştırmak için her parçaya kendi boyutunu vererek, türbin ve hava akışı için ağ oluşturmak için kullanılır. Mesh sayıları 12 kanatlı model için (7×10^6), 24 kanatlı model için (11×10^6) ve 36 kanatlı model için (14×10^6) dört ve altı yüzlü atılmıştır. Şekil 5.3' te tüm modellerin ağ yapısı görülmektedir.



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model



c. 36 kanatlı model

Şekil 5.3. (a, b, ve c) sırasıyla 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modellerinin üstündeki ağ görünümü

5.1.3. Çözücü Seçimi

Bu çalışmada basınca dayalı bir çözücü üzerinde geçici bir simülasyon seçilmiştir. ANSYS Fluent' te, basınca dayalı bir çözücünün iki tekniği vardır: çift ve ayrılmış algoritma. Düzenleyici denklemler daha sonra, ayrılmış yöntem boyunca birbirinden ayrılarak ardışık olarak çözülürken, momentum denklemleri ve ayrıca basınca dayalı süreklilik denklemi, birleştirilmiş algoritma boyunca birleştirilmiş şekilde birlikte çözülür. Bağlı algoritma, hızlı yakınsama açısından ayrılmış yöntemi geride bırakır, bununla birlikte birleştirilmiş yaklaşım, ayrılmış algoritmadan daha fazla alan/bellek gerektirmektedir (Abusannuga 2022).

5.1.4. Türbülans Modelinin Seçilmesi

SST k- ω türbülans modeli, sınır tabaka ayrılması ve aerodinamik çözümlemede oldukça başarı göstermiştir (Erkan ve diğerleri 2020). SST k- ω türbülans modeli Analizde kesme gerilmesi taşınımı (SST) k – ω modeli kullanılmıştır (Mamaghani ve Jenkins 2020). Teori ve tanımlar bölümü 3.9 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Temelleri' de açıklanmıştır. Bu modeli kullanılarak sabit durumda ve 3B basınca dayalı bir modelde simülasyon gerçekleştirilmektedir (Abusannuga 2022).

5.1.5. Akış Özellikleri ve Sınır Koşulları

Nümerik çalışmada ağ oluşturma işlemi gerçekleştirildikten sonra çözümlemeye geçilmiştir. ANSYS Fluent' teki sınır koşulları, akışın çözüm alanına çeşitli şekillerde girmesine ve çıkmasına izin vermektedir. Bu bölüm, her bir sınır koşulu türünün nasıl kullanıldığına ve uygulanabilirlik için en uygun sınır koşullarının seçilmesine yardımcı olarak her biri için verilerin sağlandığına ilişkin ayrıntıları vermektedir. Etki alanı girişinde uygulanan akış girişi ve çıkışı sınır koşulları, çıkışta basınç çıkışı sınır koşulları ve malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1' de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. Nümerik simülasyon çözümler için sınır koşulları

Sınır koşulu	Seçim
Simülasyon türü	Sabit simülasyon
Akışkan	Hava
Akış tipi	sıkıştırılmaz akış
Sıcaklık (K)	298.15
Kinematik viskozite (m ² /s)	1.46 *10 ⁻⁵
Basınç (N/m ²)	101.325
Rüzgar hızı (m/s)	3-4-5-7.5-10
CFD algoritması	Simple
Türbülans modeli	SST k- ω
Çözüm kontrolleri	Basınç :0.5 – Momentum:0.5 –Yoğunluk 1.1 (kg/m ³) -Türbülanslı kinetik enerji :0.75 (J/kg)
Sınır şartları	Giriş hızı:3-4-5-7.5-10m/s - Basınç çıkışı (gösterge basıncı: 0)

Çıkış sınırlarında oradaki statik (gösterge) basıncın tanımı, basınç çıkış sınır koşulları tarafından gereklidir. Yalnızca akış ses altı olduğunda, verilen statik basıncın değeri kullanılır. Akış yerel olarak süpersonik hale gelirse, verilen basınç artık kullanılmayacak olup bunun yerine, basınç iç kısımdaki akıştan tahmin edilecektir. İç kısım diğer tüm akış parametrelerini tahmin etmek için kullanılır. Ardından çözüm işlemi boyunca basınç çıkış bariyerinde akış ters yönde olarak bir dizi "geri akış" kısıtlaması da verilir. Geri akış miktarlarına gerçekçi değerler verilirse yakınsama sorunları azalacaktır (Abusannuga 2022).

Bu çalışmada yan duvarlarda sınır koşulları simetri seçilmiştir. Türbin duvarlarına hareketli bir duvar (etrafında dönen) verilmiştir. İlgilenilen fiziksel geometri ve termal/akış çözümünün öngörülen dizisi ayna simetrisi olduğunda, simetri sınır koşulları kullanılmaktadır. Viskoz akışlarda, sıfır kaymalı duvarları modellemek için de kullanılabilir. Simetrik sınırlarda, tanımlanacak sınır gereksinimleri yoktur, ancak simetri sınır konumlarınızı doğru bir şekilde belirlemeye dikkat edilmesi gerekmektedir (Abusannuga 2022).

5.1.6. Çözüm Yöntemi Seçimi

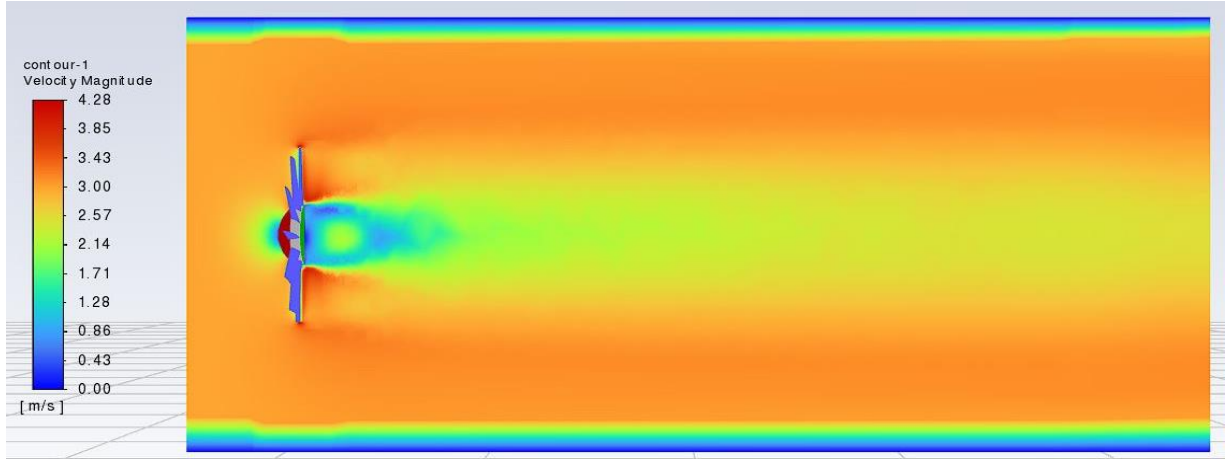
SIMPLEC, SIMPLE ve ayrıca PISO ve Fraksiyonel Adım (Yinelemeli Olmayan Zaman İlerlemesi seçeneğini (NITA) kullanan zamana bağlı akışlar için) ANSYS Fluent' te (FSM) bulunan dört tür algoritmadır. Basınca dayalı ayrılmış algoritmanın adıdır. bu tekniklere verilen. Kararlı durum hesaplamaları için SIMPLE veya SIMPLEC önerilmektedir. Bu çalışmada Basınç-hız eşleşmesi SIMPLE algoritması ile yapılmıştır. Momentum ikinci dereceden rüzgar yönü şeması ve basınç standart şema ile çözülmektedir (Bakırcı ve Yılmaz 2018) (Kaya 2021).

5.1.7. Simülasyon Sonuçları

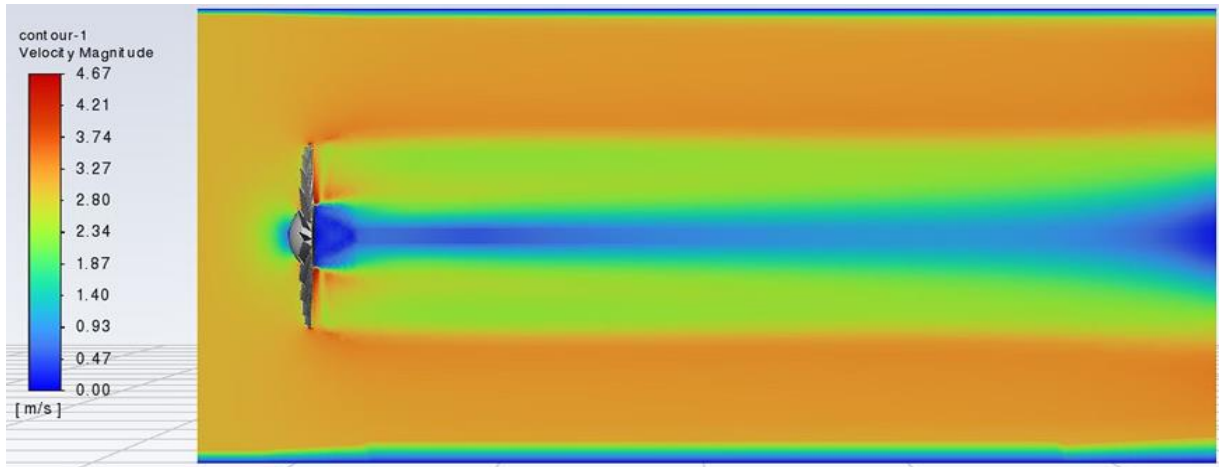
Simülasyonun sonuçları, farklı hızlarda ve farklı kanat sayılarındaki modeller için hız profilinin türbin yukarı ve aşağı akımındaki hız dağılımları farklı rüzgar hızları için (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) sırasıyla Şekil 5.7 – 5.15' te ve aynı şekilde basınç profilinin türbin yukarı ve aşağı akımındaki basınç dağılımı sırasıyla Şekil 5.8 – 5.16' da verilmiştir.

İlk olarak nümerik simülasyon 3 m/s rüzgar hızı için gerçekleştirildi. 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modellerinin hız konturunda, rotor önü ve arkası hız değerlerinde 12 kanatlı modelde Şekil 5.7a' da görülmüş olduğu gibi 3 m/s' den yaklaşık 2.25 m/s değerine düştüğü, böylece düşüş oranı yaklaşık %76 oranında olmuştur. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rüzgar hızı rotor arkasında 2m/s değerine düştüğü izlenmiştir ve düşüş oranı %66 olduğu Şekil 5.7b' de tespit edilmiştir. Son olarak 36 kanatlı model, rotor arkasında olan rüzgar hızı değeri yaklaşık 1.8 m/s olarak Şekil 5.7c' de görülmüştür, böylece düşüş oranının %63 olarak bu modelde rüzgar hızının en fazla düştüğü tespit edilmiştir.

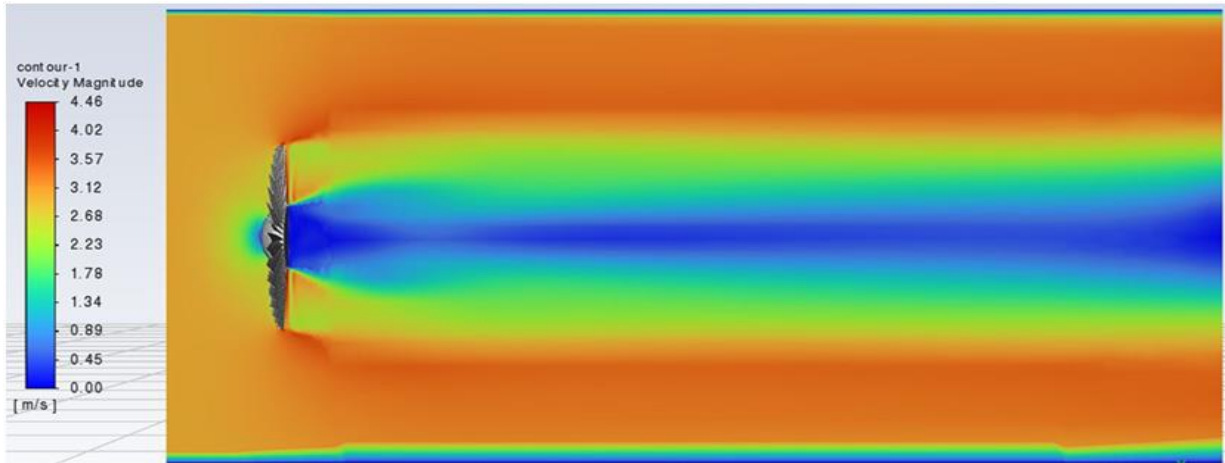
Basınç ise, 3 m/s rüzgar hızında 12 kanatlı modelde Şekil 5.8a' da gösterilmiş olduğu gibi rotor önünde yaklaşık 1.91 Pa atmosfer basıncının üzerinde fazla basınç ve arkasında, yaklaşık 3.5 Pa düşük basınç izlenmiştir. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinin önünde 4.08 Pa atmosfer basıncının üzerinden fazla basınç değeri rotor arkasında yaklaşık 4 Pa düşük basınç Şekil 5.8b' de görülmüştür. 36 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise Şekil 5.8c' de gözlemlenmiş olduğu gibi 6 Pa atmosferden fazla basınç değeri rotor arkasında 4.5 Pa düşük basınç değeri görülmüştür.



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

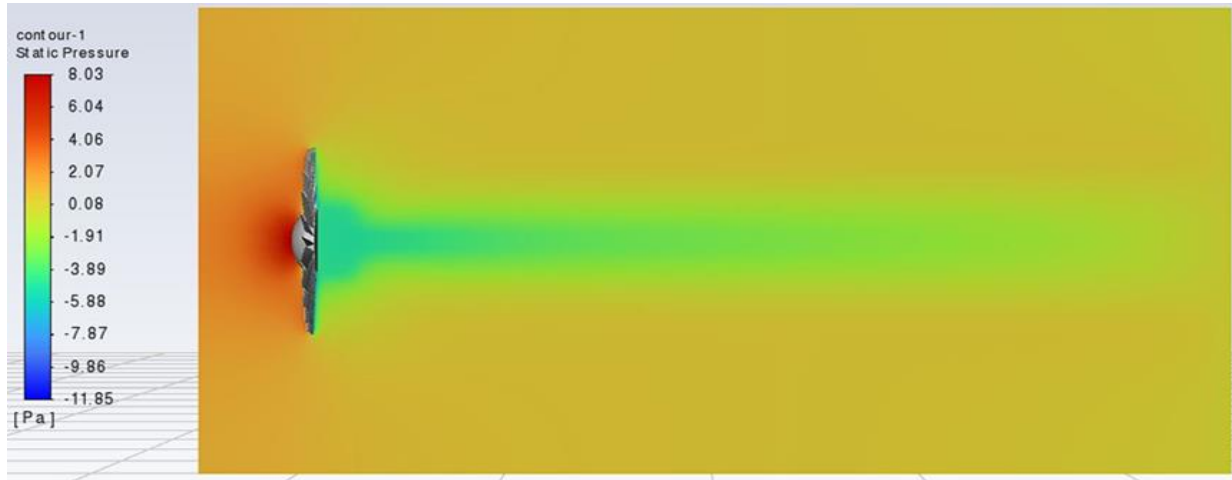


c. 36 kanatlı model

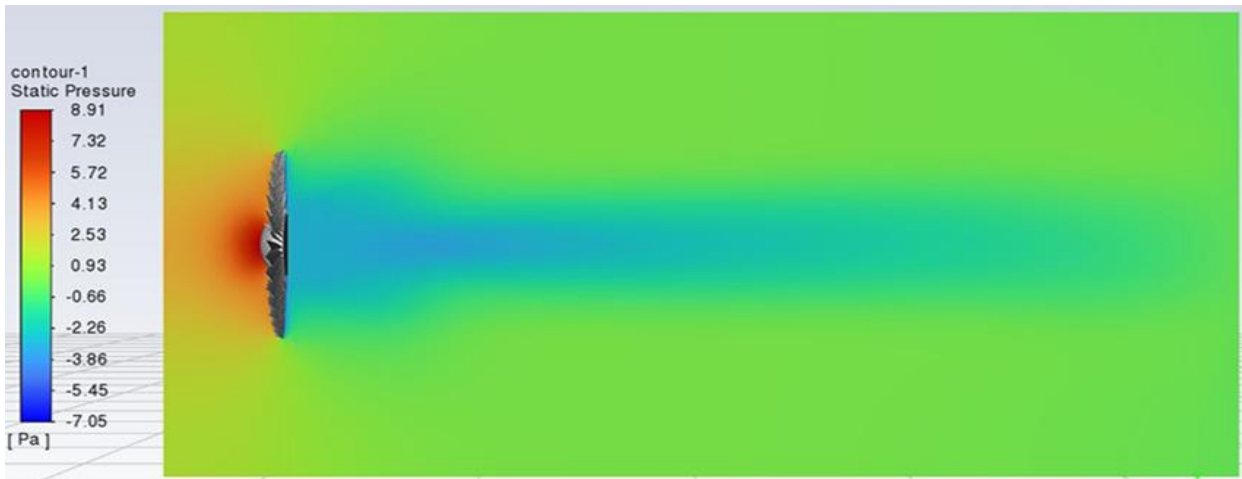
Şekil 5.7.(a,b ve c) 3m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki hız dağılımı konturları



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

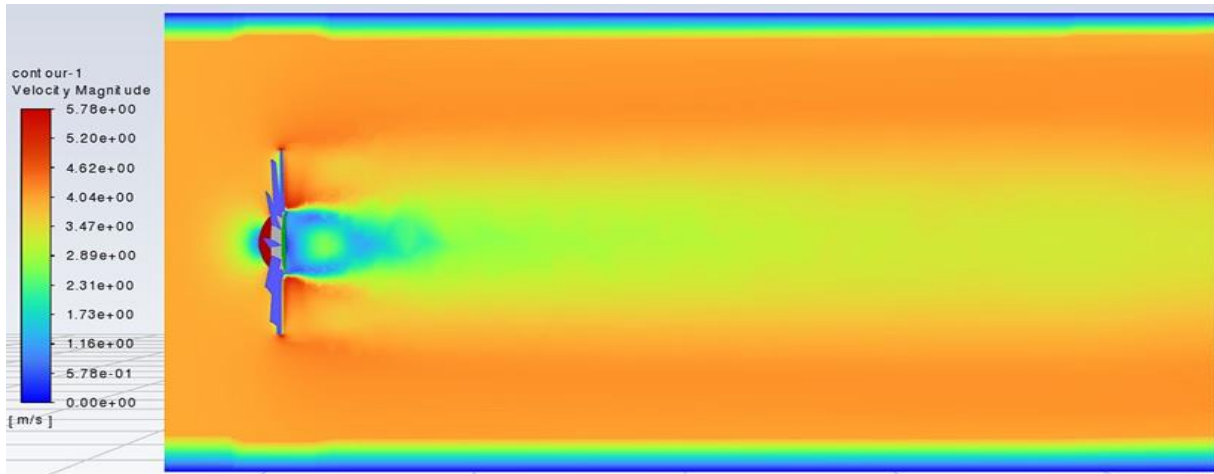


c. 36 kanatlı model

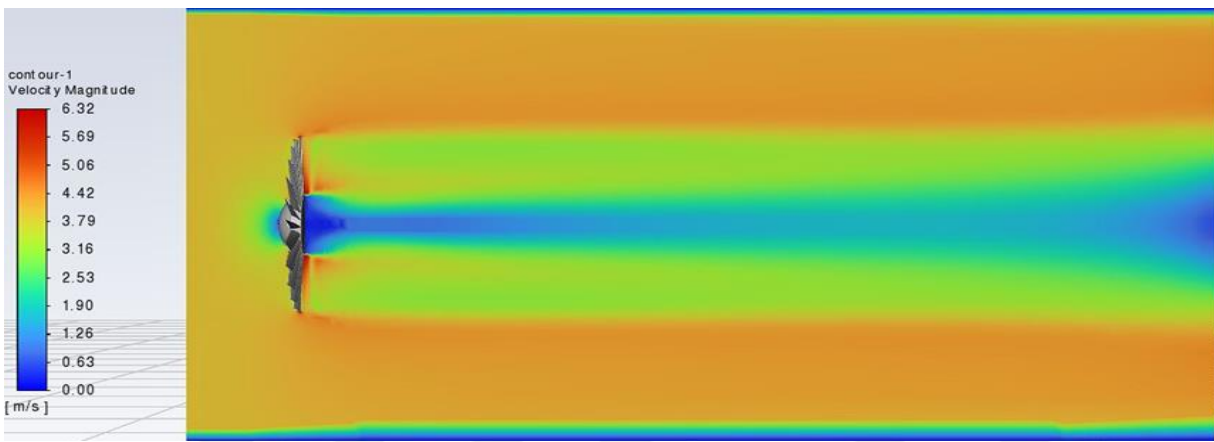
Şekil 5.8.(a,b ve c) 3m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki basınç dağılımı konturları

İkinci olarak nümerik simülasyon 4 m/s rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. 12 kanatlı modelde Şekil 5.9a' da görülmüş olduğu gibi 4 m/s' den yaklaşık 2.9 m/s değerine düşmüştür. Düşüş oranı ise %73 oranında olmuştur. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rüzgar hızı rotor arkasında 2.5 m/s değerine düştüğü izlenmiştir ve düşüş oranı %62 olduğu Şekil 5.9b' de tespit edilmiştir. Son olarak 36 kanatlı model, rotor arkasında olan rüzgar hızı değeri yaklaşık 2 m/s olarak Şekil 5.9c' de görülmüştür, böylece düşüş oranının %50 olarak bu modelde rüzgar hızının en fazla düştüğü tespit edilmiştir.

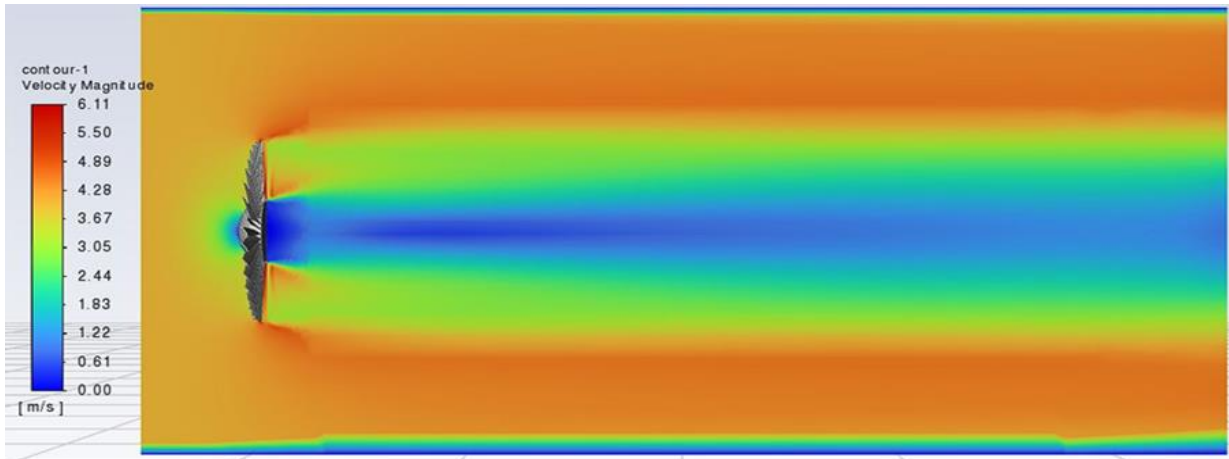
Basınç ise, 4 m/s rüzgar hızında 12 kanatlı modelde Şekil 5.10a' da gösterilmiş olduğu gibi rotor önünde 3.5 Pa atmosferden fazla basınç değeri rotor arkasında 8 Pa düşük basınç değeri izlenmiştir. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinin rotor önünde 9 Pa atmosferden fazla olan basınç değeri rotor arkasında 10 Pa düşük basınç değerine düştüğü Şekil 5.10b' de görülmüştür. 36 kanatlı rüzgar türbini modelinde Şekil 5.10c' de gözlemlenmiş olduğu gibi rotor önünde 8.82 Pa atmosferden fazla olan basınç değeri rotor arkasında 7 Pa düşük basınç değerine düştüğü tespit edilmiştir.



a. 12 kanatlı model

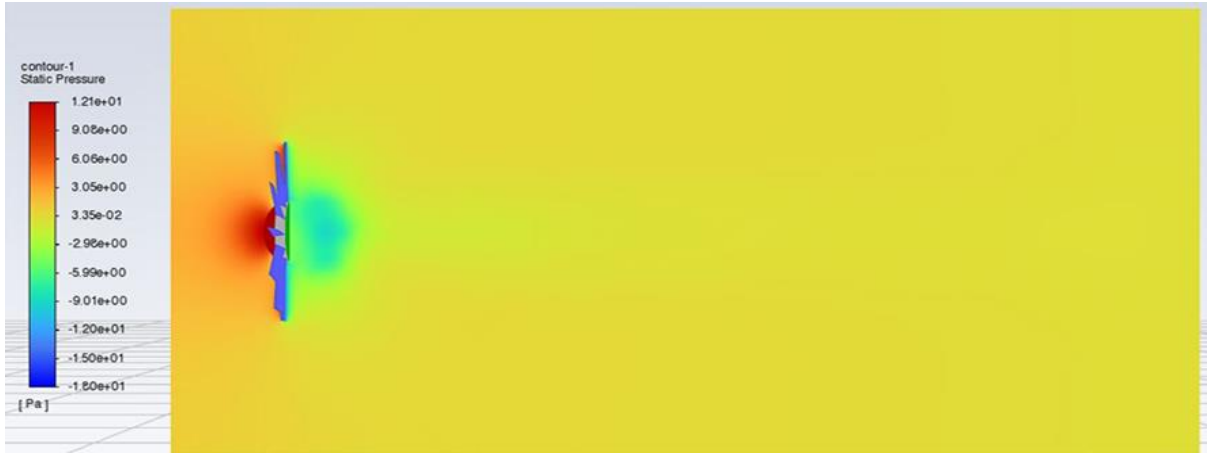


b. 24 kanatlı model

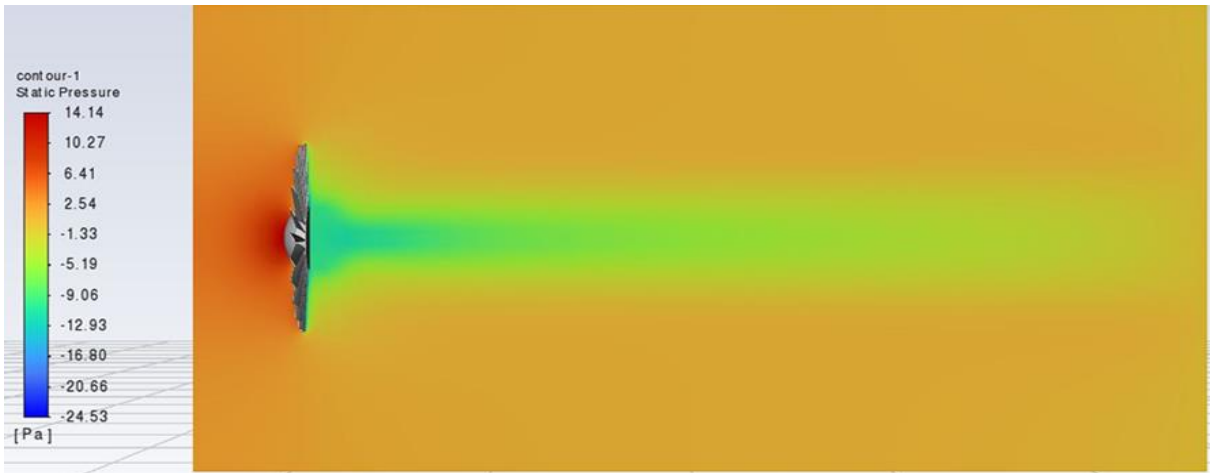


c. 36 kanatlı model

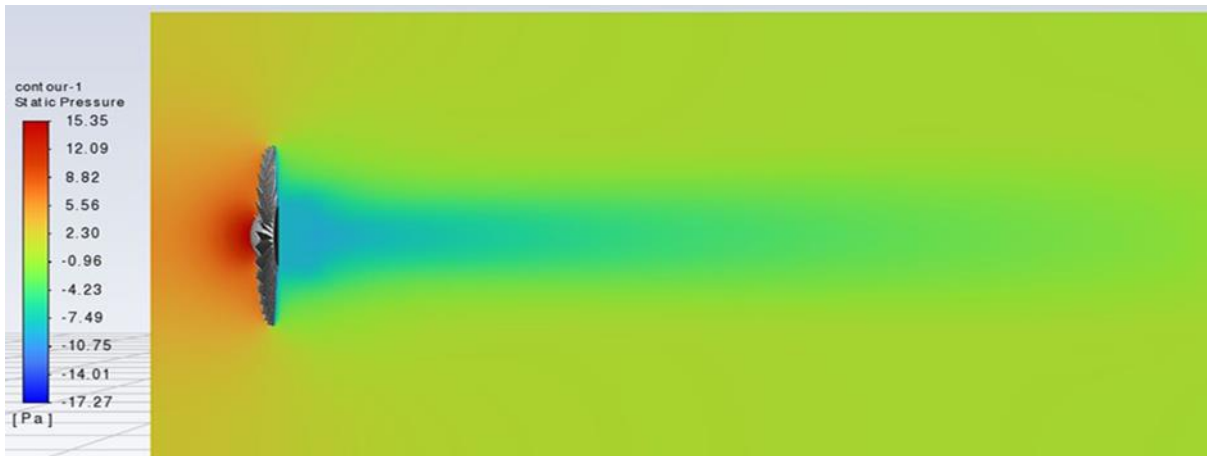
Şekil 5.9.(a,b ve c) 4m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki hız dağılımı konturları



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

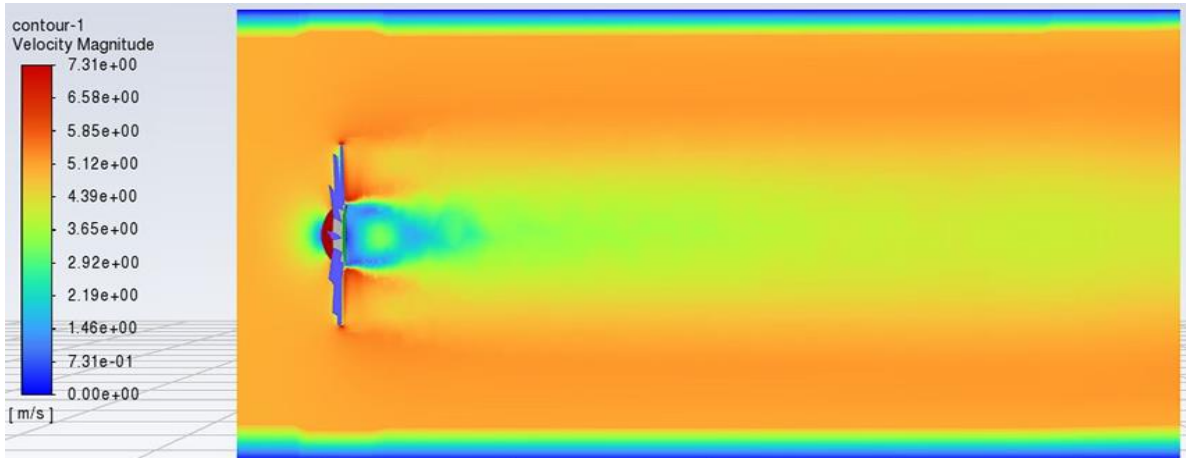


c. 36 kanatlı model

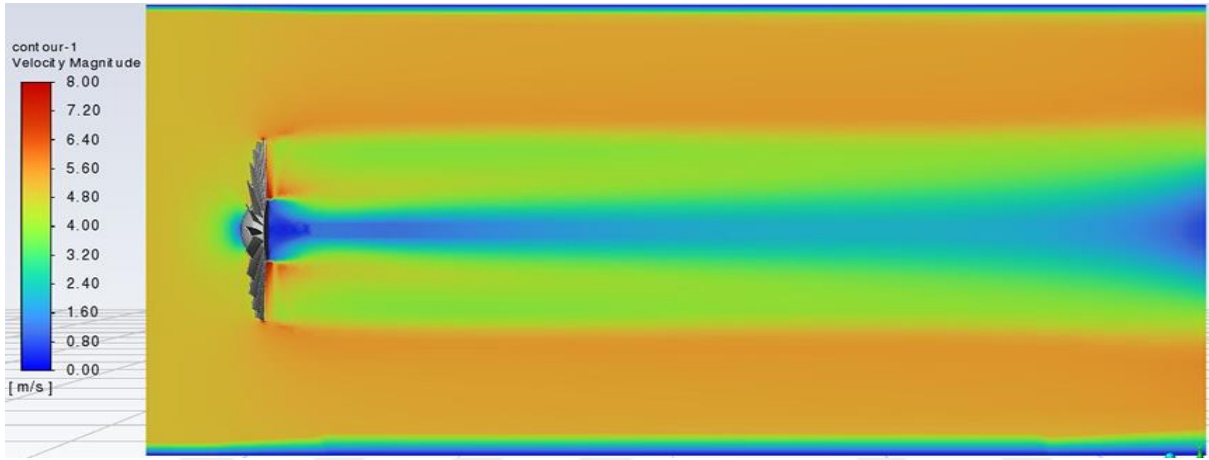
Şekil 5.10.(a,b ve c) 4m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki basınç dağılımı konturları

Üçüncü olarak nümerik simülasyon 5 m/s rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. 12 kanatlı modelde Şekil 5.11a' da görülmüş olduğu gibi 5m/s' den yaklaşık 4.02m/s değerine düştüğü, böylece düşüş oranı %80 oranında olmuştur. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise Şekil 5.11b' de görüldüğü gibi rüzgar hızı rotor arkasında 3.6m/s değerine düşmüştür. Düşüş oranı %71 olarak hesaplanmıştır. Son olarak 36 kanatlı model, rotor arkasında olan rüzgar hızı değeri yaklaşık 2.7m/s olarak Şekil 5.11c' de görülmüştür, böylece düşüş oranının %53 olarak bu modelde en rüzgar hızının en fazla düştüğü tespit edilmiştir.

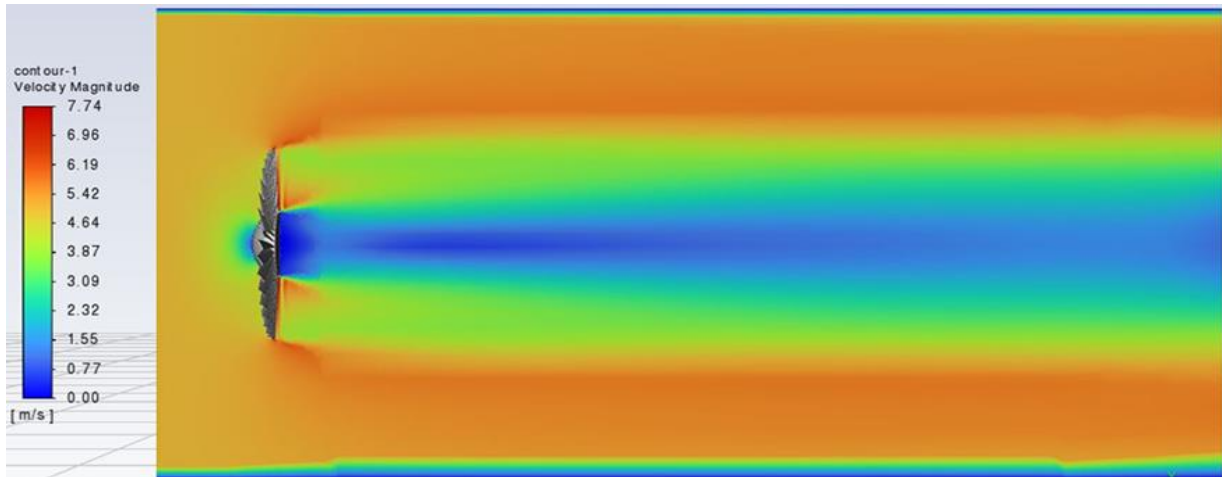
Basınç ise, 5 m/s rüzgar hızında Şekil 5.12a' da gösterilmiş olduğu gibi 12 kanatlı rüzgar türbin modelinde rotor önünde yaklaşık 4.42 Pa atmosferden fazla olan basınç değeri rotor arkasında 14 Pa düşük basınç değerine düştüğü izlenmiştir. Şekil 5.12b' de 24 kanatlı rüzgar türbini modeli için rotor önünde 15.80 Pa atmosferden fazla basınç değeri rotor arkasında 15.72 Pa düşük basınç değeri verdiği izlenmiştir. 36 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rotor önünde 13.5 Pa atmosferden fazla olan basınç rotor arkasında 9 Pa düşük basınç değerine düştüğü Şekil 5.12c 'de gözlemlenmiştir.



a. 12 kanatlı model

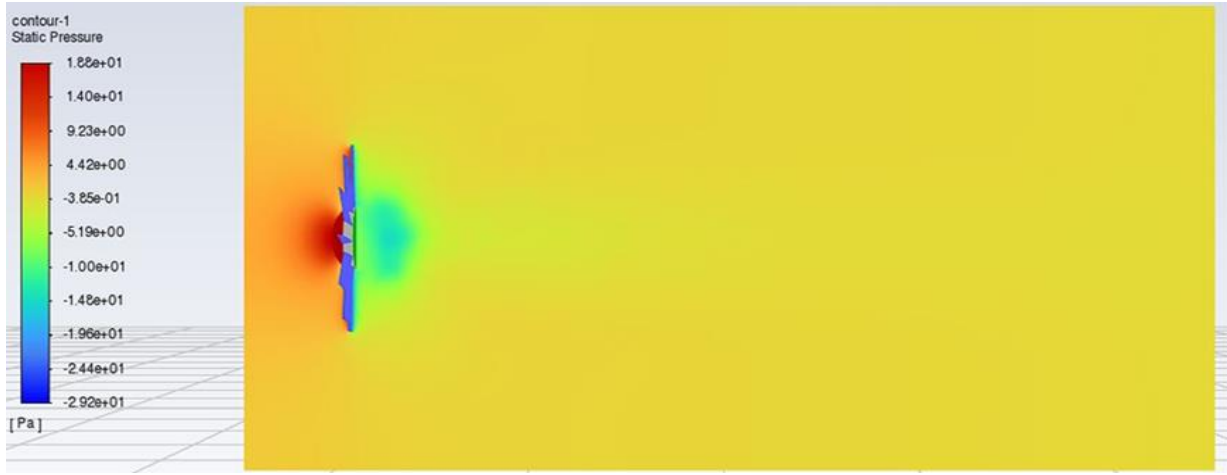


b. 24 kanatlı model

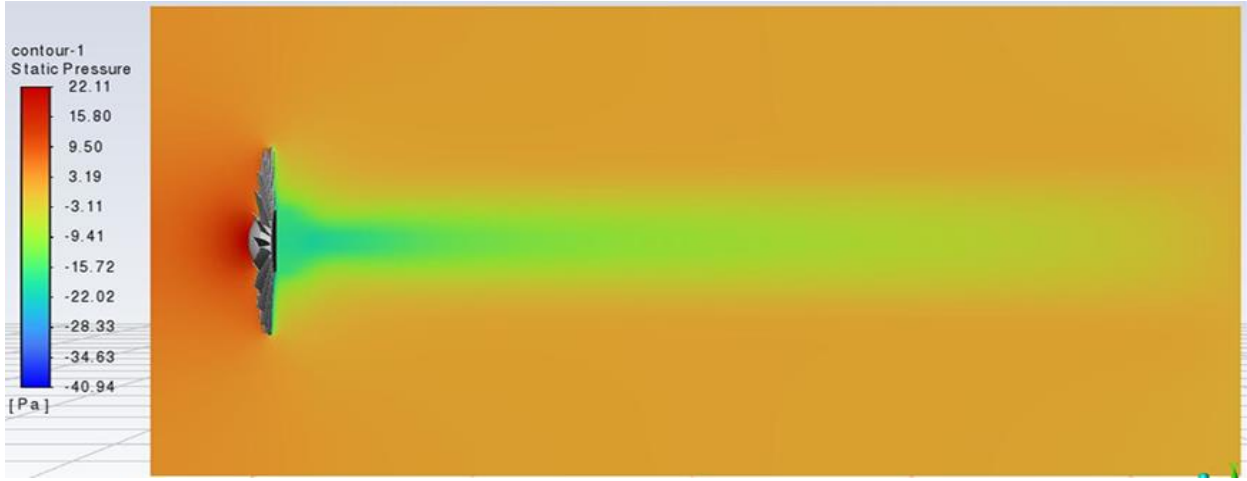


c. 36 kanatlı model

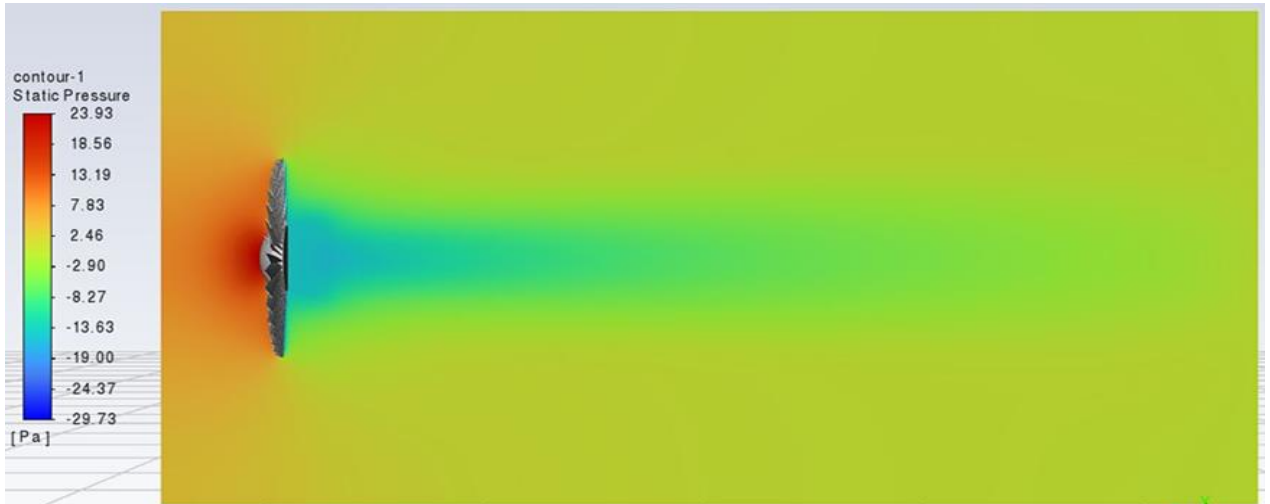
Şekil 5.11.(a,b ve c) 5m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki hız dağılımı konturları



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

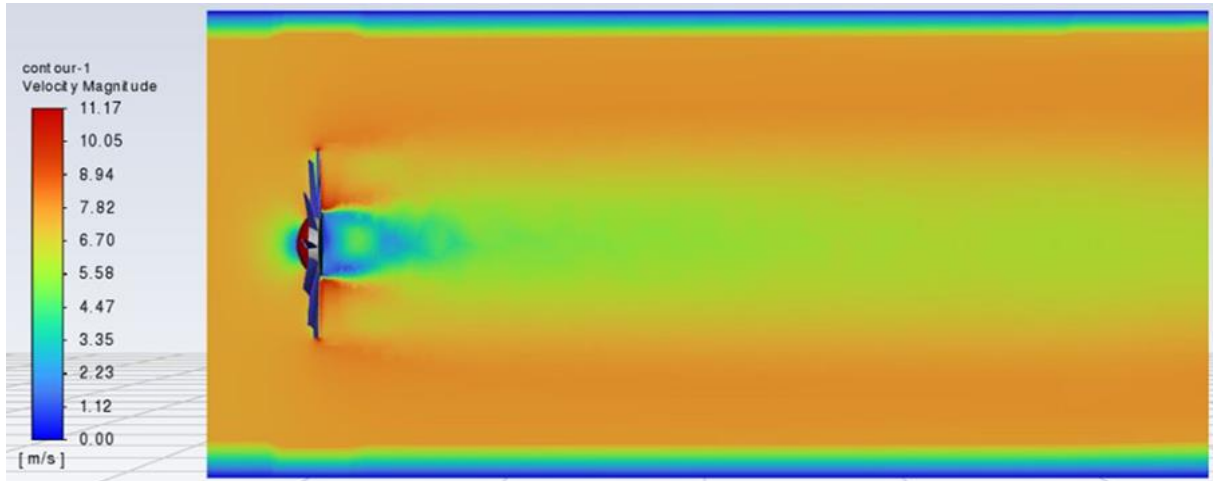


c. 36 kanatlı model

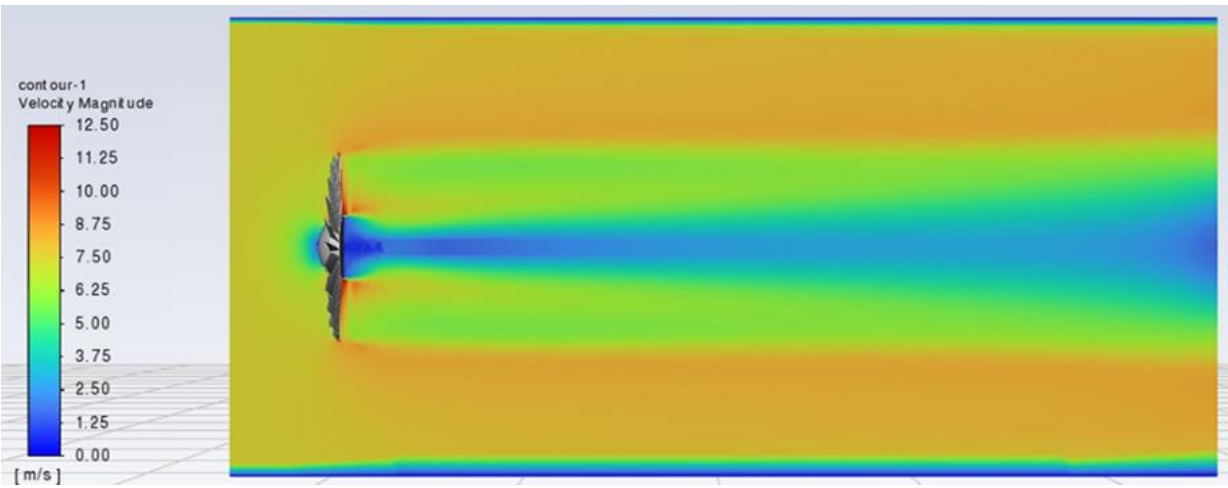
Şekil 5.12.(a,b ve c) 5m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki basınç dağılımı konturları

Dördüncü olarak nümerik simülasyon 7.5 m/s rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. 12 kanatlı modelde Şekil 5.13a' da görülmüş olduğu gibi rüzgar hızı rotor önünde 7.5 m/s' iken rotor arkasında 6m/s olmuştur, ve düşüş oranı %80 olarak hesaplanmıştır. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rüzgar hızı rotor arkasında 5m/s değerine düştüğü izlenmiştir. Düşüş oranı %66 olduğu Şekil 5.13b' de tespit edilmiştir. Son olarak 36 kanatlı model, rotor arkasında olan rüzgar hızı değeri yaklaşık 3.9m/s olarak Şekil 5.13c' de görülmüştür. Böylece düşüş oranının %52 olarak hesaplanmıştır.

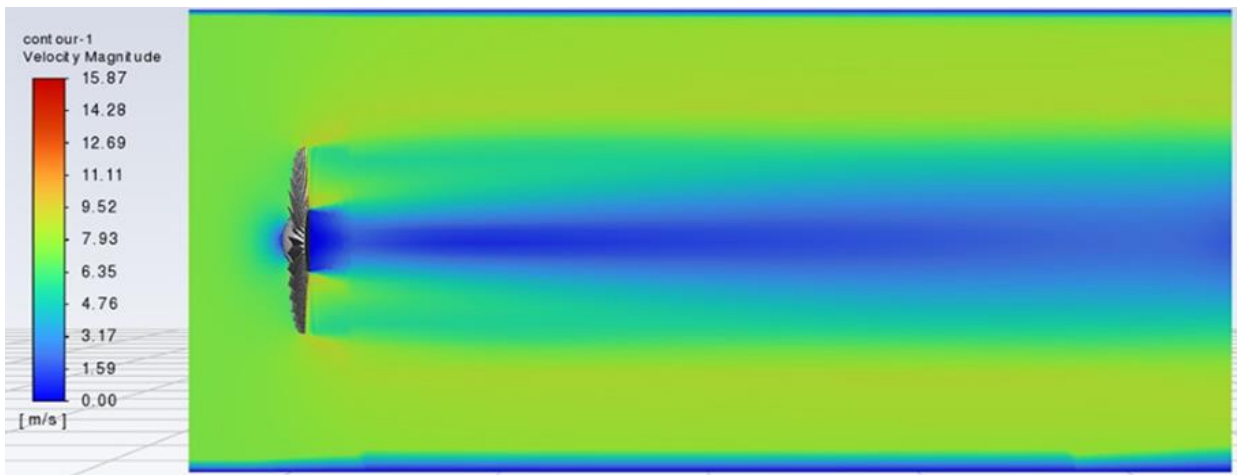
Basınç ise, 5 m/s rüzgar hızında Şekil 5.14a' da gösterilmiş olduğu gibi 12 kanatlı rüzgar türbin modelinde rotor önünde yaklaşık 8 Pa atmosferden fazla olan basınç değeri rotor arkasında 15 Pa düşük basınç değerine düştüğü izlenmiştir. Şekil 5.14b' de 24 kanatlı rüzgar türbini modeli için rotor önünde 10 Pa atmosferden fazla basınç değeri rotor arkasında 17 Pa düşük basınç değeri verdiği izlenmiştir. 36 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rotor önünde 13.8 Pa atmosferden fazla olan basınç rotor arkasında 9.5 Pa düşük basınç değerine düştüğü Şekil 5.14c 'de gözlemlenmiştir.



a. 12 kanatlı model

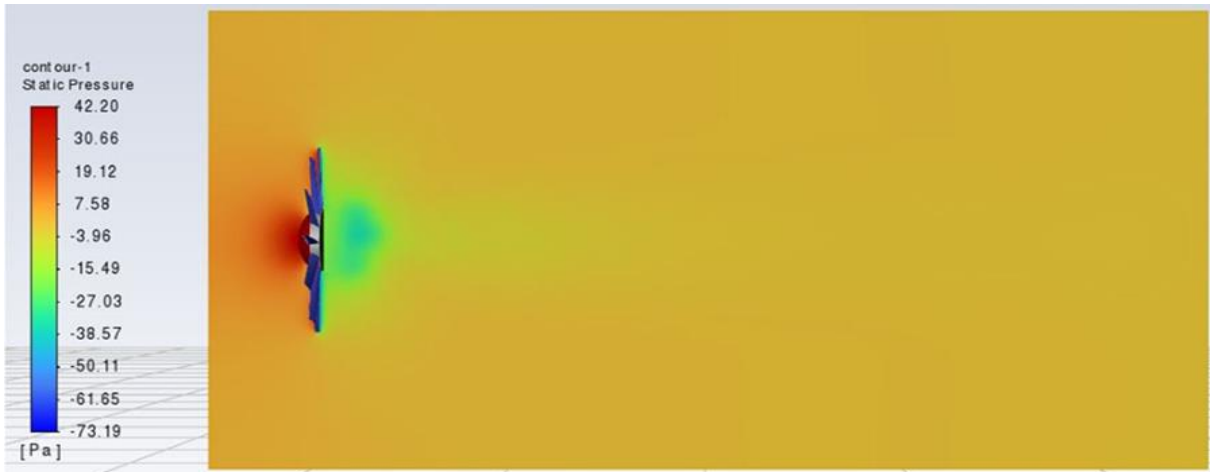


b. 24 kanatlı model

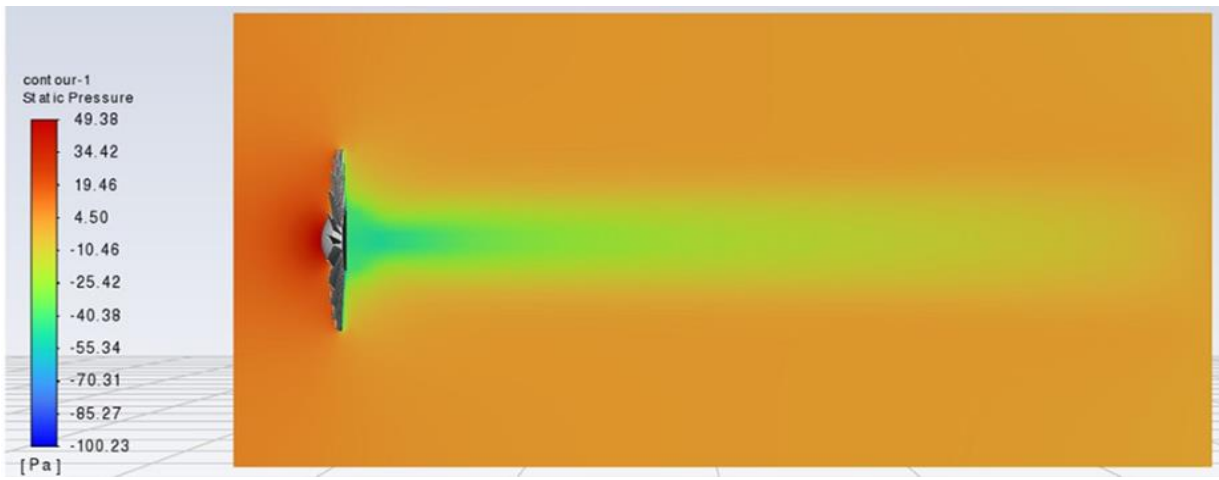


c. 36 kanatlı model

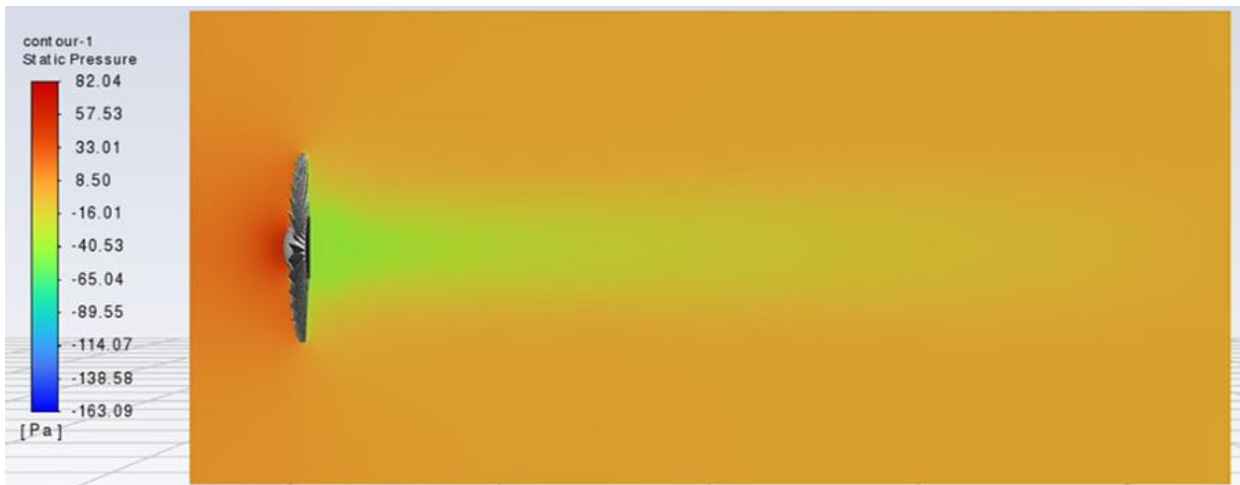
Şekil 5.13.(a,b ve c) 7.5m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki hız dağılımı konturları



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

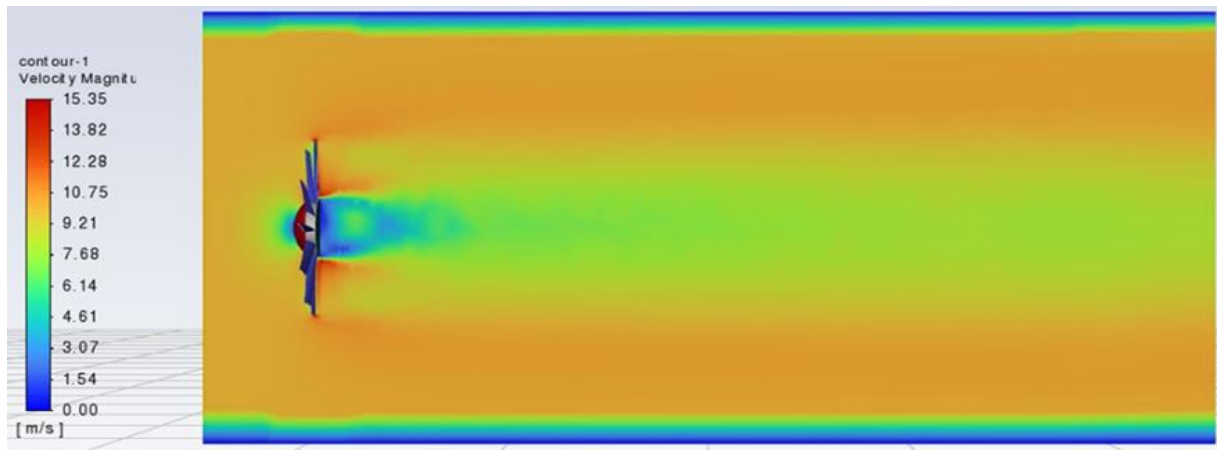


c. 36 kanatlı model

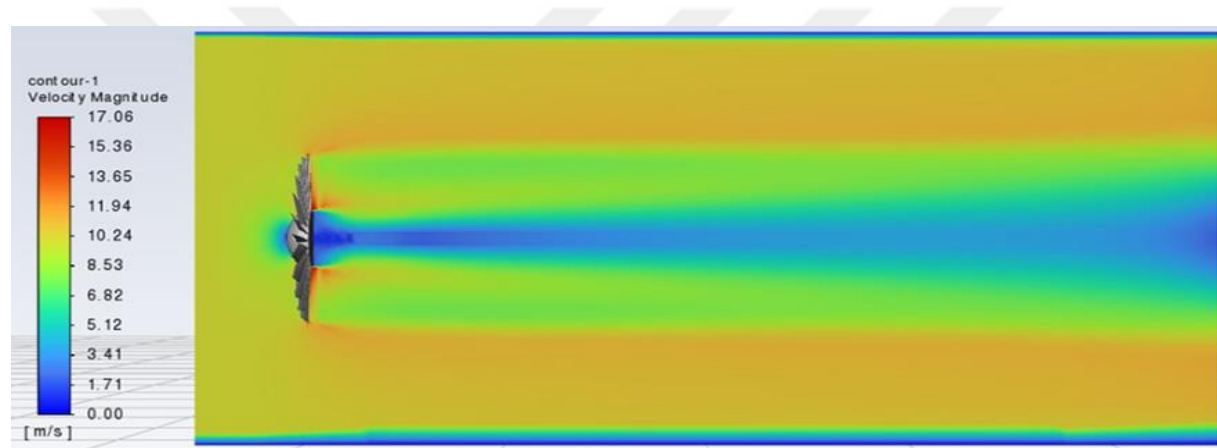
Şekil 5.14.(a,b ve c) 7.5m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki basınç dağılımı konturları

Beşinci ve son olarak nümerik simülasyon 10 m/s rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. 12 kanatlı modelde Şekil 5.15a' da görülmüş olduğu gibi 10 m/s' den yaklaşık 7.68 m/s değerine düştüğü, böylece düşüş oranı %76 oranında olmuştur. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rüzgar hızı rotor arkasında 6m/s değerine düştüğü gözlemlenmiştir ve düşüş oranı %60 olduğu Şekil 5.15b' de görülmüştür. Son olarak 36 kanatlı model, rotor arkasında olan rüzgar hızı değeri yaklaşık 5.5 m/s olarak Şekil 5.15c' de görülmüştür. Böylece düşüş oranının %55 olarak bu modelde rüzgar hızının en fazla düştüğü tespit edilmiştir.

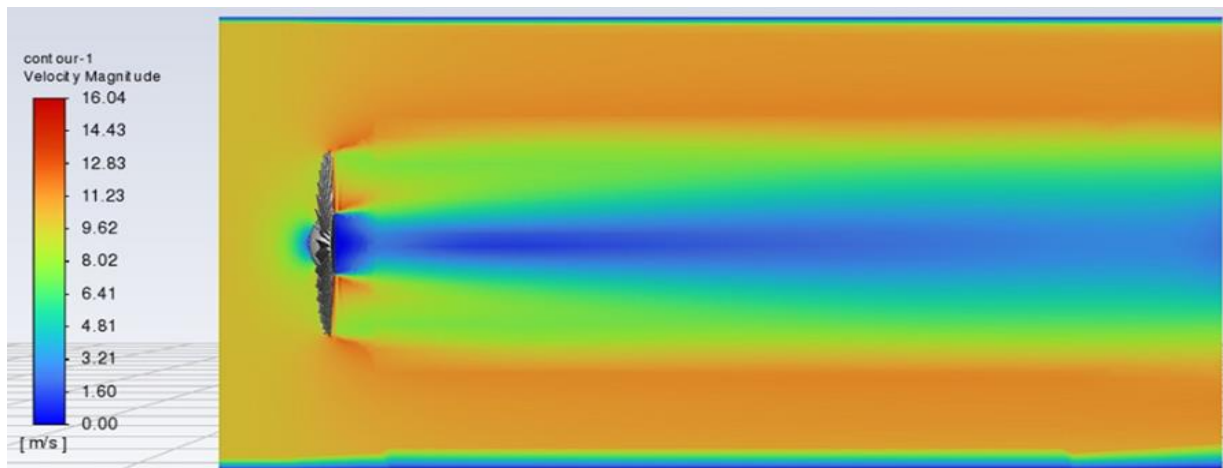
Basınç ise, 10m/s rüzgar hızında 12 kanatlı modelde Şekil 5.16' da gösterilmiş olduğu gibi rotor önünde yaklaşık 10 Pa atmosferden fazla olan basınç rotor arkasında 32 Pa düşük basınç değerine düştüğü izlenmiştir. 24 kanatlı rüzgar türbini modelinin önünde 19 Pa atmosferden fazla olan basınç değeri rotor arkasında 20 Pa düşük basınç değerine düştüğü Şekil 5.16b' de görülmüştür. 36 kanatlı rüzgar türbini modelinde ise rotor önünde 22 Pa atmosferden fazla basınç rotor arkasında 25 Pa düşük basınca dönüştüğü Şekil 5.16c' de gözlemlenmiştir. Rüzgar hızı arttıkça kanat sayısı yüksek (24 ve 36) olan rüzgar türbini modellerinin rotorları arkasındaki basınç düşüşü azalmıştır. Bunun sebebi kanat sayısının fazla olduğu böylece havanın rotor arkasına geçmek için zorlandığından dolayı, akımın rotor arkasında azaldığı için basınç düşüşü göstermiştir.



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model

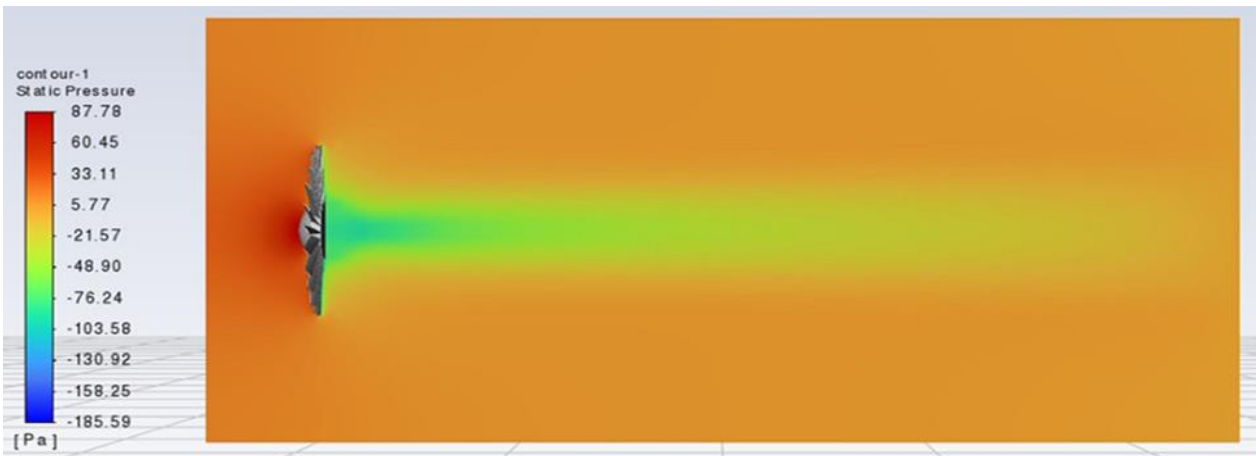


c. 36 kanatlı model

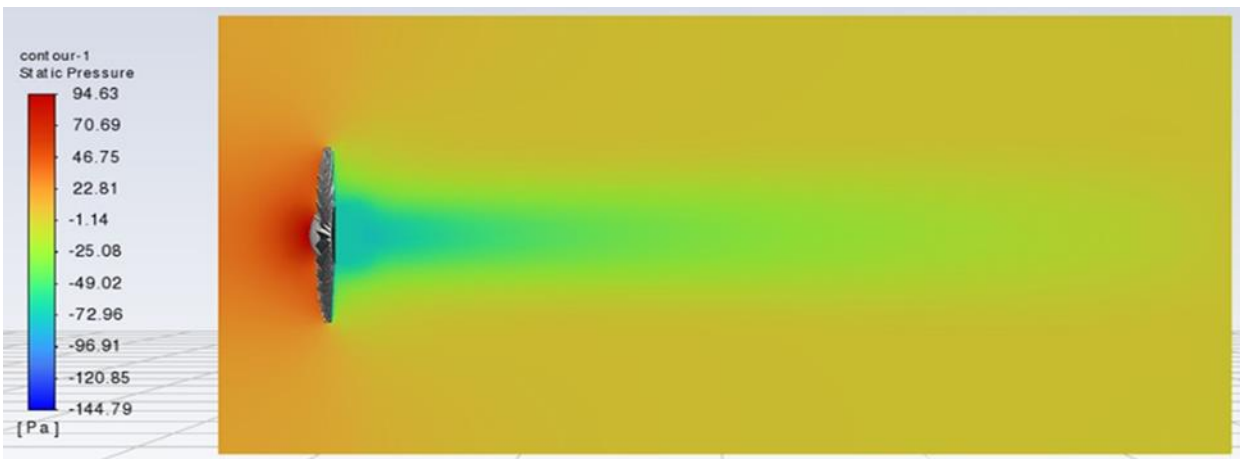
Şekil 5.15.(a,b ve c) 10m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki hız dağılımı konturları



a. 12 kanatlı model



b. 24 kanatlı model



c. 36 kanatlı model

Şekil 5.16.(a,b ve c) 10m/s rüzgar hızı için 12, 24 ve 36 kanatlı rüzgar türbini modeli etrafındaki basınç dağılımı konturları

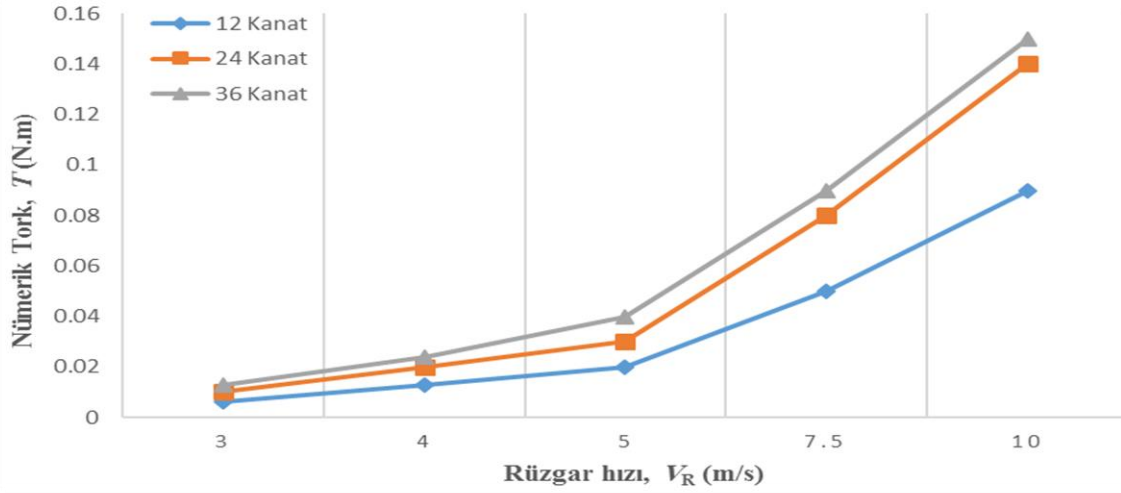
5.1.8. Nümerik Analiz Sonuçları ve Tartışma

Nümerik analizde 3 farklı kanat sayılı rüzgar türbini modelleri için 5 farklı rüzgar hızlarında (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) 15 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma (CFD) sonuçlarına göre türbin yukarı ve aşağı akımındaki hız ve basınç dağılımlarından elde edilen tork, güç ve güç katsayısı değerleri elde edilmiştir ve Şekil 5.7-5.16' verilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar Çizelge 5.2'ye aktarılmıştır. Gerçekleştirilmiş simülasyonlar için güç, tork, güç katsayısı değerleri verilmiştir ve aynı zamanda 24 cm rüzgar türbini için elde edilen güç ve tork değerleri benzerlik denklemleri ve boyutsuz sayılar kullanarak 240 cm rüzgar türbini için teorik olarak hesaplanmış ve P_P ve T_P olarak tanımlanmıştır. 12 kanatlı rüzgar türbini modelinin gösterdiği güç performansı 24 ve 36 kanatlı modellerin altında olmuştur. En son tork, güç ve güç katsayısı değerlerinin farklı rüzgar hızlarına bağlı değişimi Şekil 5.17' de grafik halinde sunulmuştur.

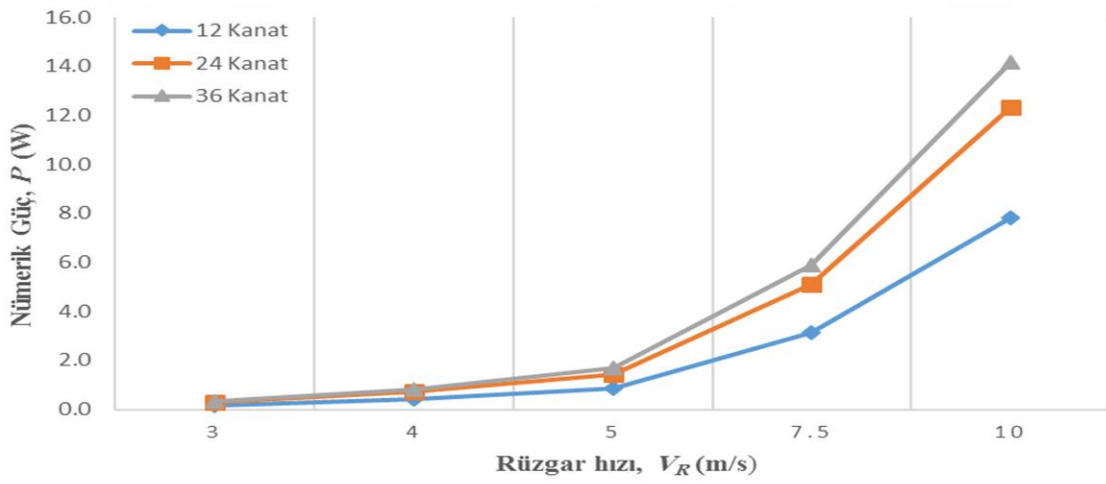
Çizelge 5.2. 12, 24 ve 36 kanatlı 1/10 ölçekli rüzgar türbini modelleri (D=24cm) için farklı hızlarda elde edilen güç, tork ve güç katsayısı değerlerinin nümerik analiz sonuçları

Rüzgar hızı, V_R (m/s)	Açısal hız, ω (rad/s)	Rüzgar Türbini Modeli														
		12 Kanatlı					24 Kanatlı					36 Kanatlı				
		Güç, P_m (W) model skala 1/10 D= 24 cm	Güç, P_p *(W) D= 240cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D= 24 cm	Tork* T_p (N.m) D= 240 cm	Güç katsayısı C_p	Güç, P_m (W) model skala 1/10 D= 24 cm	Güç, P_p * (W) D= 240 cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D= 24 cm	Tork,** T_p (N.m) D= 240cm	Güç katsayısı C_p	Güç, P_m (W) model skala 1/10 D= 24 cm	Güç, P_p * (W) D= 240 cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D= 24 cm	Tork, * T_p (N.m) D= 240 cm	Güç katsayısı C_p
3	25.0	0.17	17.0	0.006	0.60	0.22	0.29	29	0.01	1	0.38	0.32	32.0	0.013	1.3	0.420
4	33.3	0.43	43.0	0.013	1.30	0.24	0.72	72	0.02	2	0.41	0.83	83.0	0.024	2.4	0.460
5	41.6	0.88	88.0	0.020	2.0	0.25	1.45	145	0.03	3	0.42	1.67	167.0	0.04	4.0	0.480
7.5	62.5	3.13	313.0	0.050	5.0	0.27	5.09	509	0.08	8	0.44	5.88	588.0	0.09	9.0	0.493
10	83.3	7.83	783.0	0.090	9.0	0.28	12.33	1233	0.14	14	0.45	14.17	1417.0	0.15	15.0	0.498

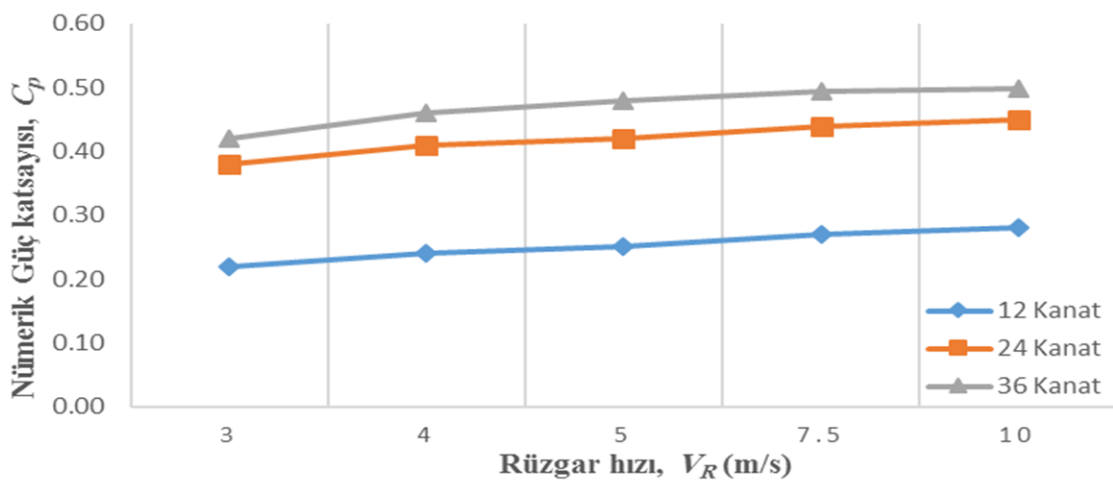
* P_p ve T_p değerleri 24 cm rüzgar türbini için elde edilen güç ve tork değerleri benzerlik denklemleri ve boyutsuz sayılar kullanarak 240 cm rüzgar türbini için teorik olarak hesaplanmıştır



a. Nümerik tork değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



b. Nümerik güç değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



c. Nümerik güç katsayısı değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi

Şekil 5.17. (a, b ve c) farklı kanat sayısına sahip rüzgar türbini modellerinin nümerik analizlerden elde edilen sırasıyla tork, güç ve güç katsayısı değerlerinin farklı rüzgar hızlarına bağlı değişimi

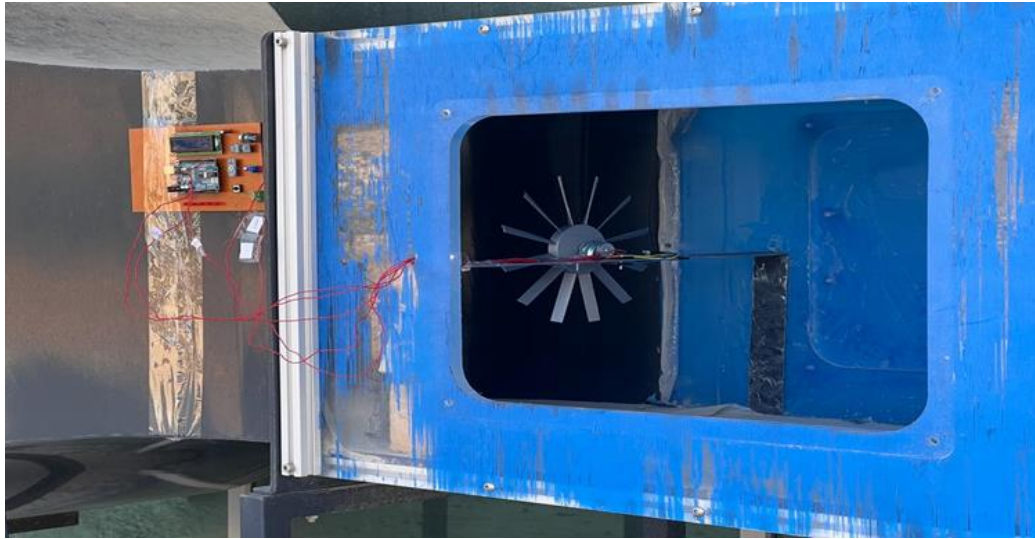
Şekil 5.17a, b ve c' de sunulmuş olan grafiklerde görüldüğü gibi rüzgar hızı arttıkça tork değerleri ikinci dereceden parabolik artış göstermiştir. Güç değerleri ise üçüncü dereceden parabolik bir artış göstermiştir. 36 kanatlı rüzgar türbini modeli 24 kanatlı modelden yaklaşık %9 daha fazla olurken 12 kanatlı rüzgar türbini modeli 24 kanatlı modelden %41 daha düşük güç performans gösterdiği izlenmiştir. Dolayısıyla 24 kanatlı rüzgar türbini yapılması maliyet yönünden 36 kanatlı yapmaktan daha ekonomik olacaktır ve aradaki %9 güç artışı için daha fazla kanat sayısı yapılmasına gerek görülmeyebilir.

5.2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalar Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi D-blok enerji sistemleri laboratuvarındaki rüzgar tüneline kullanılarak yapılmıştır. Rüzgar tüneline motor hız ayarları Şekil 5.18' de görülen frekans konvertörü ile kumanda edilerek yapılmıştır. Ölçüm cihazı tüneline pencere olduğu tarafına şeffaf bant ile yapıştırılmış ve güç için USB kablosu ile bilgisayara bağlanarak rüzgar hızlarını değiştirerek voltaj ve akım ölçümü yapılmıştır. Şekil 5.19' da ölçüm cihazı gösterilmiştir. Rüzgar tüneline hava hızlarının motor devir frekansına bağlı değerleri ve bu değerler için okunan akım, voltaj ve devir sayısı değerleri Çizelge 5.3' te verilmiştir.



Şekil 5.18. Rüzgar tüneline fan motorunu devir sayısı ayarı için kullanılan sürücü (frekans konvertörü) kumandası



Şekil 5.19. Test bölgesine kurulu model türbin ve ölçüm cihazı

Çizelge 5.3. Deneysel çalışmada 5 farklı rüzgar hızına karşı motor frekansı ve 3 farklı rüzgar türbini için voltaj ve akım değerleri

Motor Frekansı (Hz)	Rüzgar hızı, V_r (m/s)	Rüzgar Türbini Modeli								
		12 Kanatlı			24 Kanatlı			36 Kanatlı		
		Devir Sayısı, N (devir/dakika)	Voltaj, E (volt)	Akım, I (amper)	Devir Sayısı, N (devir/dakika)	Voltaj, E (volt)	Akım, I (amper)	Devir Sayısı, N (devir/dakika)	Voltaj, E (volt)	Akım, I (amper)
5,2	3	195	4,26	0,045	210	4,48	0,05	216	4,70	0,054
6,4	4	260	4,76	0,070	280	5,20	0,11	289	5,42	0,120
8	5	325	5,28	0,130	350	6,32	0,19	361	6,48	0,200
11,2	7,5	490	6,88	0,370	525	7,74	0,53	544	7,94	0,600
14,7	10	653	8,22	0,770	700	8,94	0,82	724	9,74	0,970

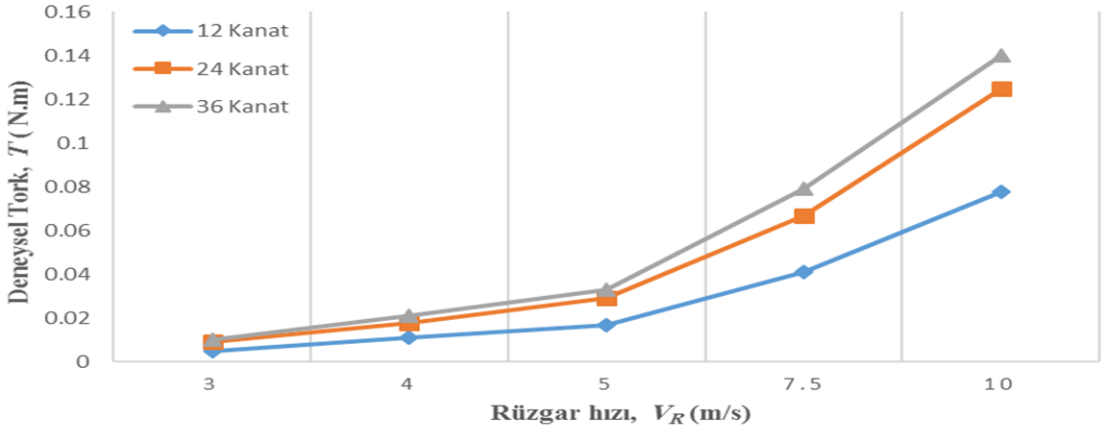
5.2.1. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Tartışma

Deneysel çalışmada 5 farklı rüzgar hızlarında (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) 3 farklı kanat sayılı rüzgar türbini modelleri rüzgar tüneli içinde sırayla ilk başta 12 kanatlı sonrası 24 kanatlı ve en son 36 kanatlı model test edilmiştir. Akım ve voltaj değerleri çarpılarak güç değerleri ve güç değerini devir sayısına bölerek tork değeri elde edilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.4' de verilmiştir. Aynı şekilde 24 cm rüzgar türbini için elde edilen güç ve tork değerleri benzerlik denklemleri ve boyutsuz sayılar kullanarak 240 cm rüzgar türbini için teorik olarak hesaplanmış ve P_p ve T_p olarak tanımlanmıştır. Elde edilen bu değerler ile sırasıyla tork, güç ve güç katsayısı değerleri farklı rüzgar hızlarına bağlı değişimi Şekil 5.20' de grafik halinde sunulmuştur.

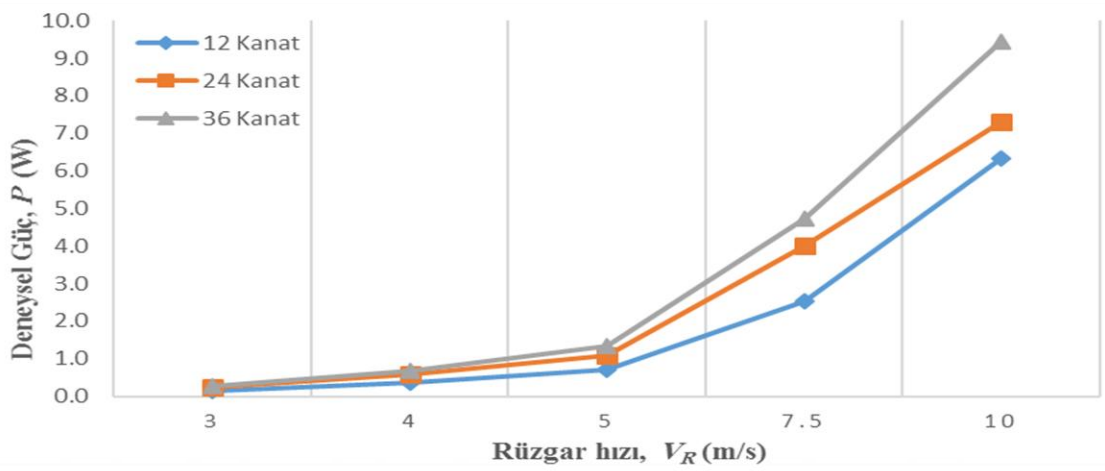
Çizelge 5.4. 12, 24 ve 36 kanatlı 1/10 ölçekli rüzgar türbini modelleri (D=24cm) için farklı hızlarda elde edilen deneysel güç, tork ve güç katsayısı değerleri

Rüzgar hızı, V_r (m/s)	Rüzgar Türbini Modeli														
	12 Kanatlı					24 Kanatlı					36 Kanatlı				
	Güç, P_m (W) model skala 1/10 D=24 cm	Güç, P_p (W) prototip D=240 cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D=24 cm	Tork, T_p (N.m) prototip D=240 cm	Güç katsayısı C_p	Güç, P_m (W) model skala 1/10 D=24 cm	Güç, P_p (W) prototip D=240 cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D=24 cm	Tork (N.m) prototip D=240 cm	Güç katsayısı C_p	Güç, P_m (W) model skala 1/10 D=24 cm	Güç, P_p (W) prototip D=240 cm	Tork, T_m (N.m) model skala 1/10 D=24 cm	Tork, T_p (N.m) prototip D=240 cm	Güç katsayısı C_p
3	0.15	15	0.005	0.5	0.18	0.26	26	0.009	0.9	0.33	0.28	28	0.012	1.2	0.37
4	0.38	38	0.011	1.1	0.20	0.65	65	0.016	1.6	0.35	0.75	75	0.020	2	0.40
5	0.79	79	0.018	1.8	0.22	1.30	130	0.026	2.6	0.37	1.4	140	0.036	3.6	0.42
7.5	2.80	280	0.041	4.1	0.24	4.40	440	0.067	6.7	0.39	4.9	490	0.079	7.9	0.44
10	6.90	690	0.078	7.8	0.25	8.00	800	0.120	12.0	0.40	9.44	944	0.130	13	0.45

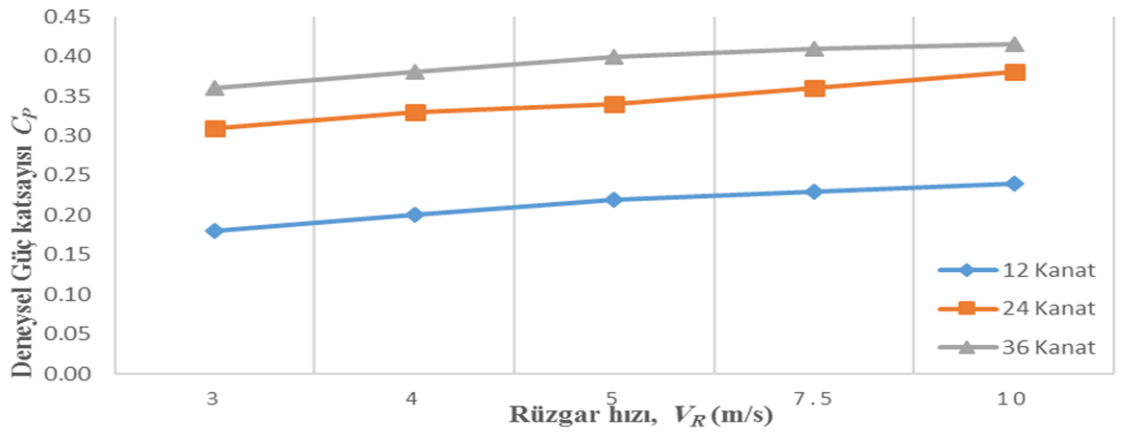
* P_p ve T_p değerleri 24 cm rüzgar türbini için elde edilen güç, güç katsayısı ve tork değerleri benzerlik denklemleri ve boyutsuz sayılar kullanarak 240 cm rüzgar türbini için teorik olarak hesaplanmıştır



a. Deneysel tork değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



b. Deneysel güç değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



c. Deneysel güç katsayısı değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi

Şekil 5.20. (a, b ve c) Farklı kanat sayısına sahip rüzgar türbini modellerinin deneysel çalışmada elde edilen sırasıyla tork, güç ve güç katsayısı değerlerinin rüzgar hızlarına bağlı değişimi

Şekil 5.20a, b ve c' de sunulmuş olan grafiklerde görüldüğü gibi rüzgar hızı arttıkça tork değerleri ikinci dereceden parabolik artış göstermiştir. Güç değerleri ise üçüncü dereceden parabolik bir artış göstermiştir. 36 kanatlı rüzgar türbini modeli 24 kanatlı modelden yaklaşık %9.5 daha fazla olurken 12 kanatlı rüzgar türbini modeli 24 kanatlı modelden %50 daha düşük güç performansı elde ettiği izlenmiştir. Dolayısıyla 24 kanatlı rüzgar türbini yapılması maliyet yönünden 36 kanatlı yapmaktan daha ekonomik olacağı ve aradaki %9.5 güç artışı için daha fazla kanat sayısı yapılması gerek görülmeyeceği değerlendirilmiştir.

5.2.2. Deneysel Bulguların Hata Analizi

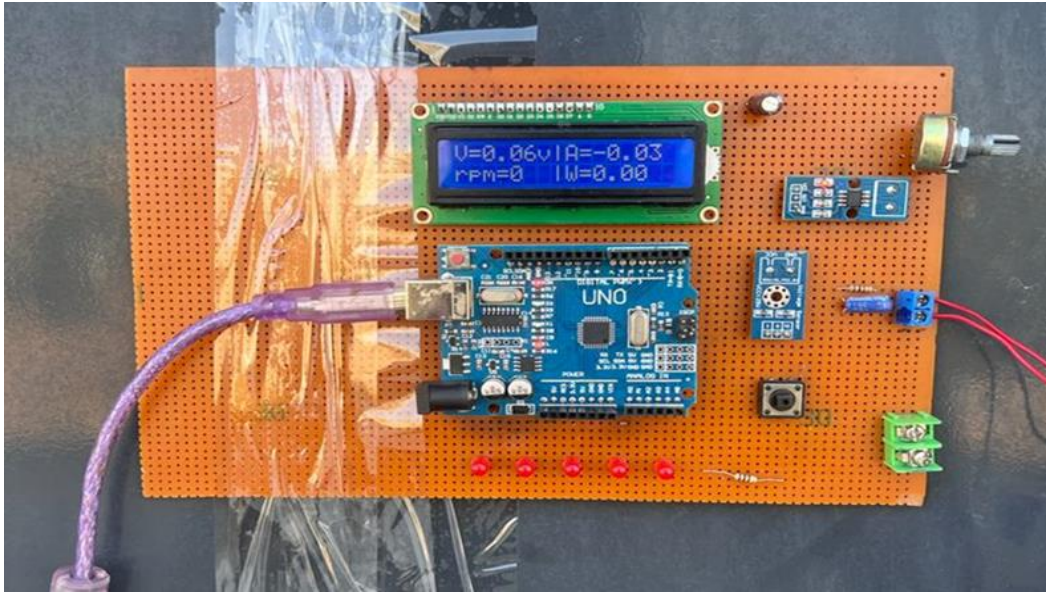
Deneysel çalışmanın elde edilen sonuçlarının hata oranını hesaplamak için hata analizi yapılmıştır. Sistem verimine etki eden faktörler dikkate alınarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Sistem verimi $\eta_s = \frac{P_D}{P_R}$ olarak tanımlanmıştır. Buradan

$$\eta_s = \frac{V_E I}{0.5 \rho A V^3} = \frac{V_E I}{0.51.225 \cdot 0.045 V^3}$$

$$\eta_s = 36.4 \frac{V_E I}{V^3}$$

Eşitliği elde edilir ve üç adet değişken bulunmaktadır. Bunlar voltaj V_E , akım I ve rüzgar hızı V 'dir. Sistemdeki toplam belirsizliği (hatayı) belirleyebilmek için Kline ve McClintock yöntemi kullanılmıştır. Sistem verimi η_s eşitliğinin her üç değişkene göre kısmi türevleri alınır. Deneysel çalışmada kullanılan ölçme cihazlarının hata değerleri Şekil 5.21' de görülmektedir.



Şekil 5.21. Akım ve voltaj değerlerindeki okuma hatalarının kalibrasyon değerleri

Deney sisteminde kullanılan ölçme cihazlarına ait hata payları ise rüzgar hız ölçeri için (0-10 m/s) ± 0.05 m/s, Akım (0-1 amper) de ± 0.03 amper ve Voltaj (0-12 volt) ± 0.06 volt olarak tespit edildi. Deney sisteminde alınan ortalama değerler 12, 24, ve 36 kanatlı rüzgar türbini modelleri için aşağıdaki Çizelge 5.5'te verilmektedir.

Çizelge 5.5. Deneysel çalışmada okunan değerlerin ortalaması

Ortalama Değerler	Rüzgar türbini modeli		
	12 Kanat	24 Kanat	36 Kanat
Akım I (amper)	0.28	0.4	0.43
Voltaj V_E (volt)	5.88	6.54	6.86
Rüzgar hızı V (m/s)	5.9	5.9	5.9
Sistem verimi η_s	0.29	0.46	0.51

Verilen ortalama değerlere göre kısmi türevler, 12, 24, ve 36 kanatlı rüzgar türbini modelleri için bulunur.

12 kanatlı rüzgar türbini için:

$$\frac{\partial \eta}{\partial V_E} = \frac{I}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{0.28}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 0.049$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = \frac{V_E}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{5.88}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 1.038$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial V} = -3 \frac{V_E I}{\rho A 0.5 V^4} = \frac{5.88 * 0.28}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 1212} = -0.147$$

24 kanatlı rüzgar türbini için:

$$\frac{\partial \eta}{\partial V_E} = \frac{I}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{0.4}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 0.07$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = \frac{V_E}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{6.54}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 1.14$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial V} = -3 \frac{V_E I}{\rho A 0.5 V^4} = \frac{0.46.54}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 1212} = -0.23$$

36 kanatlı rüzgar türbini için:

$$\frac{\partial \eta}{\partial V_E} = \frac{I}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{0.43}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 0.075$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = \frac{V_E}{\rho A 0.5 V^3} = \frac{6.86}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 205.4} = 1.22$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial V} = -3 \frac{V_E I}{\rho A 0.5 V^4} = \frac{0.43 * 6.86}{1.225 * 0.045 * 0.5 * 1212} = -0.264$$

Ölçüm cihazlarında hata miktarları. $W_{V_E} = 0.06$ volt, $W_I = 0.03$ amper ve $W_V = 0.05$ m/s rüzgar hızı için verilmektedir. Sistemin hata payı:

$$W_{\eta_s} = [(\frac{\partial \eta}{\partial V_E} * W_{V_E})^2 + (\frac{\partial \eta}{\partial I} * W_I)^2 + (\frac{\partial \eta}{\partial V} * W_V)^2]^{1/2}$$

12 kanatlı rüzgar türbini için:

$$W_{\eta_s} = [(0.049 * 0.06)^2 + (1.038 * 0.03)^2 + (-0.147 * 0.05)^2]^{1/2}$$

$$W_{\eta_s} = 0.32$$

$$\text{Hata} = \frac{W_{\eta_s}}{\eta_s} = \frac{0.32}{0.29} = 1.103 \%$$

24 kanatlı rüzgar türbini için:

$$W_{\eta_s} = [(0.07 * 0.06)^2 + (1.14 * 0.03)^2 + (-0.23 * 0.05)^2]^{1/2}$$

$$W_{\eta_s} = 0.36$$

$$\text{Hata} = \frac{W\eta_s}{\eta_s} = \frac{0.36}{0.46} = 0.78 \%$$

36 kanatlı rüzgar türbini için:

$$W_{\eta_s} = [(0.075 * 0.06)^2 + (1.21 * 0.03)^2 + (-0.264 * 0.05)^2]^{1/2}$$

$$W_{\eta_s} = 0.39$$

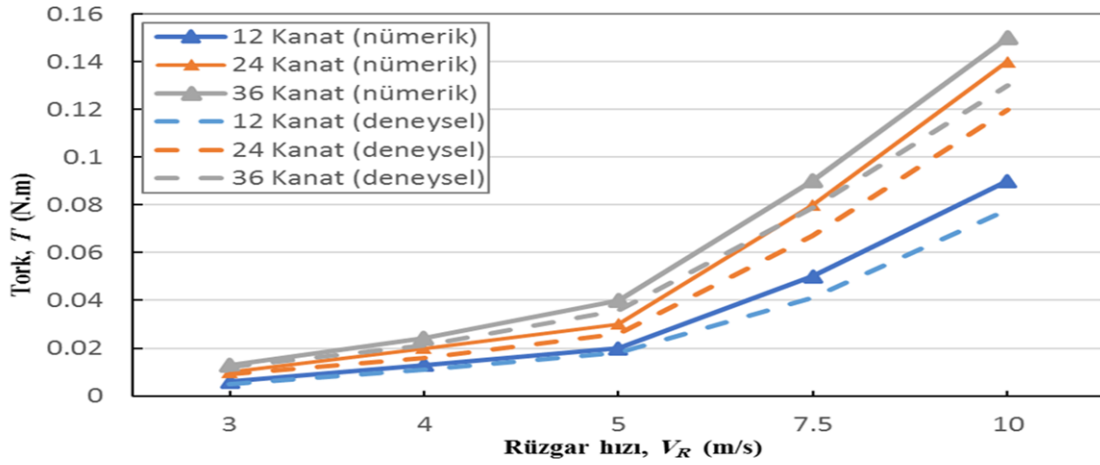
$$\text{Hata} = \frac{W\eta_s}{\eta_s} = \frac{0.39}{0.51} = 0.75 \%$$

5.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmanın Karşılaştırılması

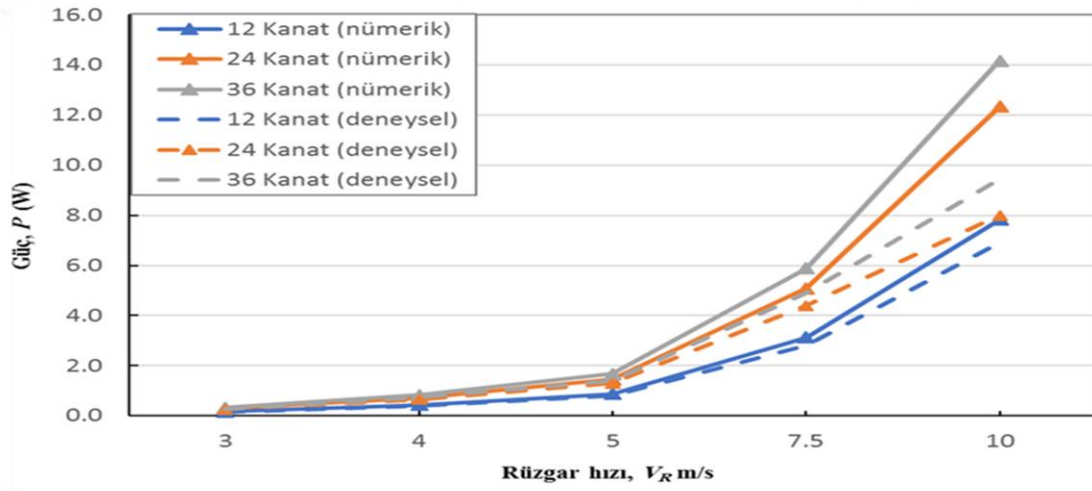
Nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarında görülen farklar, deneysel çalışmada kullanılan dinamodan kaynaklanan sürtünme ve güç kaybı olabilir. Aynı zamanda rüzgar tüneline kayıp kaçaklardan kaynaklanan hız ve basınç kayıpları da rol oynayabilir. Çizelge 5.6' da nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarının arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Aynı zamanda Şekil 5.22 a, b ve c' de nümerik ve deneysel tork, güç ve güç katsayısı değerlerinin arasındaki farklar grafikler halinde sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Nümerik ve deneysel sonuçların arasındaki yüzdesel farklar

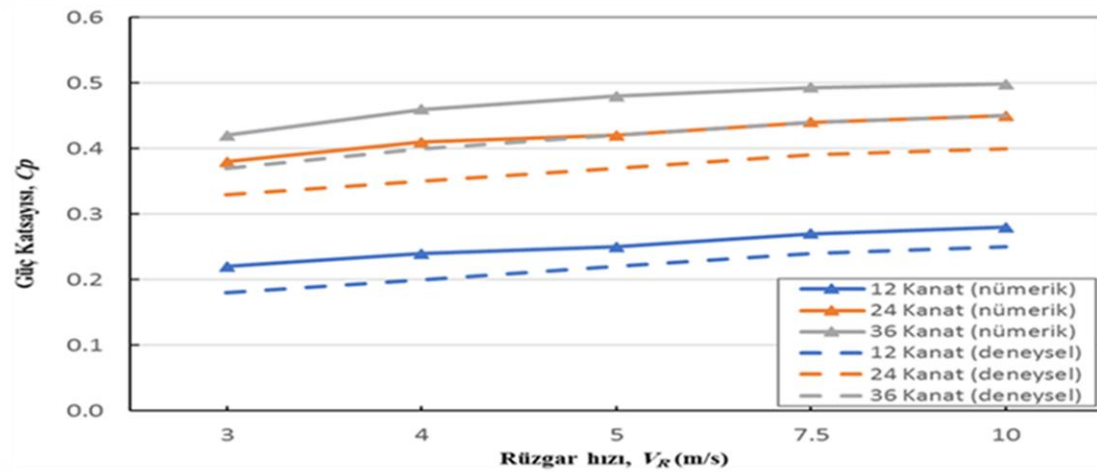
Rüzgar türbini modeli	Rüzgar hızı. V_r (m/s)	Nümerik sonuçlar			Deneysel sonuçlar			Nümerik sonuçların deneysel sonuçlardan fazla olan yüzdesel farkı		
		Tork. T (N.m)	Güç. P (W)	Güç katsayısı C_p	Tork. T (N.m)	Güç. P (W)	Güç katsayısı C_p	Tork. T (%)	Güç. P (%)	Güç katsayısı C_p (%)
12 kanatlı model	3	0,006	0,17	0,220	0,005	0,15	0,18	0,20	0,13	0,22
	4	0,013	0,43	0,240	0,011	0,38	0,20	0,18	0,13	0,20
	5	0,020	0,88	0,250	0,018	0,79	0,22	0,11	0,11	0,14
	7,5	0,050	3,13	0,270	0,041	2,80	0,24	0,22	0,12	0,13
	10	0,090	7,83	0,280	0,078	6,90	0,25	0,15	0,13	0,12
24 kanatlı model	3	0,01	0,29	0,380	0,009	0,26	0,33	0,11	0,12	0,15
	4	0,02	0,72	0,410	0,016	0,65	0,35	0,25	0,11	0,17
	5	0,03	1,45	0,420	0,026	1,30	0,37	0,15	0,12	0,14
	7,5	0,08	5,09	0,440	0,067	4,40	0,39	0,19	0,16	0,13
	10	0,14	12,33	0,450	0,120	8,00	0,40	0,17	0,54	0,13
36 kanatlı model	3	0,013	0,32	0,420	0,012	0,28	0,37	0,08	0,14	0,14
	4	0,024	0,83	0,460	0,020	0,75	0,40	0,20	0,11	0,15
	5	0,040	1,67	0,480	0,036	1,40	0,42	0,11	0,19	0,14
	7,5	0,090	5,88	0,493	0,079	4,90	0,44	0,14	0,20	0,12
	10	0,150	14,17	0,498	0,130	9,44	0,45	0,15	0,50	0,11



a. Nümerik ve deneysel tork değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



b. Nümerik ve deneysel güç değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi



c. Nümerik ve deneysel güç katsayısı değerlerinin rüzgar hızına bağlı değişimi

Şekil 5.22. (a, b ve c) Farklı kanat sayısına sahip rüzgar türbini modellerinin nümerik ve deneysel çalışmada elde edilen sırasıyla tork, güç ve güç katsayısı değerlerinin rüzgar hızlarına bağlı değişimi

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, yenilebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi kullanılarak yaklaşık 80 m derinlikten, günlük ortalama 8-10 ton bir çiftliğin su ihtiyacını karşılamak amacıyla bir rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. 12, 24 ve 36 kanatlı yatay eksenli tasarlanan rüzgar türbinlerinin 1/10 ölçekli modeli ile farklı rüzgar hızlarında (3, 4, 5, 7.5 ve 10 m/s) yapılan deneysel çalışmalarda ve nümerik analizlerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Nümerik çalışmada (CFD) analiz sonuçlarına göre türbin yukarı ve aşağı akımındaki hız ve basınç dağılımlarından elde edilen tork, güç ve güç katsayısı değerleri elde edilmiştir. Nümerik sonuçlarda 24 kanatlı türbine göre 12 kanatlı türbin gücü yaklaşık %46 daha düşük fakat 36 kanatlı türbin gücü ise yaklaşık %12 daha fazla çıkmıştır.

Deneysel sonuçlarda ise 24 kanatlı türbine göre 12 kanatlı türbin gücü %39 daha düşük fakat 36 kanatlı türbin gücü ise yaklaşık %10 daha fazla çıktığı görülmüştür.

6.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında yapılamayan fakat gelecekteki çalışmalar için tavsiye edilen öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Farklı kord uzunluğuna sahip rüzgar türbini kanatları kullanılarak rüzgar türbini performansına olan etkisi araştırılabilir.
- Farklı uç-hızı (λ) oranları alarak (1, 1.5, ve 2 gibi), uç-hızı oranının, rüzgar türbini performansına olan etkisi araştırılabilir.
- Kanat profili tipi değiştirerek ve farklı airfoil modelleri kullanarak türbin performansını ne şekilde değiştireceği araştırılabilir.
- Akış analizi ile ilgili farklı programlar ve nümerik çalışmada meş sayısı artırılarak daha hassas sonuçlar elde edilebilir.
- İmpulse-momentum ilişkisi ve türbin performansı teorik olarak analiz edilebilir.
- Kanat sayısı için 36 adetten daha fazla kanat sayısına sahip rüzgar türbinlerinin performansını nasıl etkileyeceği ayrıca araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abusannuga, H. (2022). Optimization The Performance of a Unique and Developed Type of Vertical Turbine Using Theoretical and Experimental Techniques. PhD Thesis, Karabuk University, Institute of Graduate Programs, Karabuk.
- Ahmad, S. A., 2019, Practical Design And Testing Of Wind Driven Water Pumping Systems, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* Volume 10, Issue 03, pp. 1419-1430.
- Al-Qdah, K. S., Badran, O. and Al-Salaymeh, A., 2011, A theoretical study of the performance of wind-driven pumps under Jordanian climatic conditions, *International Journal of Sustainable Energy*, 30(sup2), S184-S197.
- Bayray, M., Kiros, H., Abdelkadir, M., Mustefa, A., Hayelom, M., Haileselasie, A. and Bino, B., 2015, Performance of wind pump prototype, *Momona Ethiopian Journal of Science*, 7(2), 176-190.
- Britannica ,T., 2019, Editors of Encyclopaedia , Windmill. Encyclopedia <https://www.britannica.com/technology/windmill> [Ziyaret Tarihi : 15 Haziran 2022]
- Bakırcı, M. ve Yılmaz, S., 2018, Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speed ratio of horizontal-axis wind turbines, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2215-0986.
- Dena Hendriana, Tommy Firmansyah, Joga Dharma Setiawan and Dodi Garinto, Design and Optimization of Low Speed Horizontal-Axis Wind Turbine Using Openfoam, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 10, NO 21, NOVEMBER, 2015.
- Erkan, O., Özkan, M., Karakoç, T. H., Garrett, S. J., & Thomas, P. J. (2020). Investigation of aerodynamic performance characteristics of a wind-turbine-blade profile using the finitevolume method. *Renewable Energy*, 161, 1359-1367
- El-Ali, A., Moubayed, N. ve Outbib, R.,2007, Comparison between solar and wind energy in Lebanon. In 2007 9th *International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation* , pp. 1-5, IEEE.
- H. Versteegand and W. Malalasekera. AnIntroductionto Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Prentice Hall, 2 edition, February 2007.
- Itoje, H. J., Jerson, R. P. V. ve David W., 2020, Aerodynamic performance and blockage investigation of a cambered multi-bladed windmill, *Journal of Physics: Conference Series* 1618 042003.

- I.F.Odesola, L.G.Adinoyi, Development of Wind Powered Water Pump, *International Journal of Engineering Science and Computing*, April 2017, Volume 7 Issue No.4.
- Kaya, G. (2021). Rüzgar türbini kanatları üzerinde oluşan sınır tabaka akışının aktif yöntemler ile kontrolü. Yüksek lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Mamaghani, N. A. and Jenkins, P. E., 2020, Computational Fluid Dynamics Analysis of Multi-Bladed Horizontal Axis Wind Turbine Rotor, *World Journal of Mechanics*, 10(9), 121-138.
- Nelson, V., 2009, *Wind Energy – Renewable Energy and the Environment*, CRC Press.
- Omer, A. M., 2008, On the wind energy resources of Sudan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(8), 2117-2139.
- Prabkeao, ve Tantropiwat T., Study on wind energy potential for agricultural water pumping system in the middle part of Thailand, *Chamlong MATEC Web of Conferences 192, 03058, 2018*
- 'Pumps' by Donald R.F. Harleman. *Encyclopaedia Americana*. Encyclopaedia Americana Corporation, 1977. V.23, p. 1-9.
- Qasim, O., ve Samanci, A., 2021, A Review of Solidity and Rotor Size Effects on Water-Pumping Windmills, *5th International Students Science Congress Proceedings*. 2021.029.
- Serkan, U. S., 2003, *Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Design*, İstanbul Technical University.
- Tauseef Aized, Syed Muhammad Sohail Rehman, Sajid Kamran, Ali Hussain Kazim and Syed Ubaid Rehman .Design and analysis of wind pump for wind conditions in Pakistan .*Advances in Mechanical Engineering 2019*, Vol. 11(9) 1–18.
- Yuttachai, K., 2013, A Study on Water Pumping by Using a Small Multi-Blades Windmill for Used in a Remote Area, *Advanced Materials Research Vols 724-725* ,pp 527 530.
- Anonim, 2022, <https://www.ansys.com/applications/wind-turbine-design>., Ziyaret tarihi: [17.05.2022]

EKLER

EK -1 Ölçüm cihazı programlama kodları

```

#include <LiquidCrystal.h>
const int rs = 12, en = 11, d4 = 5, d5 = 4, d6 = 3, d7 = 7;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
const int rpm_sens=2;
int offset =20;
double W ;
long say=0;
double voltage;
long g=0;
int h=0;
const float VCC = 5.04;
double rpm_f;
int rpm;
int kanat_sayi=12; // kanat sayisi
char * messagePadded = "NECMETTİN ERBAKAN UNİVERSİTESİ";

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(rpm_sens,INPUT_PULLUP);
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("OMAR QASIM");
  for (int letter = 0; letter <= strlen(messagePadded) - 16; letter++)
  {
    showLetters(0, letter);
  }
}

void loop()
{
  float average = 0;

```

```

for(int i = 0; i < 1000; i++)
{
average = average + (.0264 * analogRead(A0) -13.51);//for the 5A mode,
}

int volt = analogRead(A1);
voltage = map(volt,0,1023, 0, 2500);
voltage /=100;

if (voltage <=(float)0.2 || ((average/1000)) >=(float) 0.01 )
{
W=(3.6)*((average/1000));
}
else
{
W=(voltage)*((average/1000)+0.04);
}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("V=  v|A=  a");
lcd.setCursor(2, 0);
lcd.print(voltage);
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print((average/1000));
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("rpm=  |W=  ");
lcd.setCursor(4, 1);
lcd.print(rpm);
lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print(W);
say=0;
g=0;
rpm=0;
while(g<=1000)

```

```
{
  if((digitalRead(rpm_sens)==0)&& h==0) {say++;h=1;}
  if((digitalRead(rpm_sens)==1)&& h==1) {h=0;}
  delay(1);
  g++;
}
rpm_f=(double)say/kanat_sayi;
rpm=rpm_f*60;

lcd.noAutoscroll();
}

void showLetters(int printStart, int startLetter)
{
  lcd.setCursor(printStart, 0);
  for (int letter = startLetter; letter <= startLetter + 15; letter++)
  {
    lcd.print(messagePadded[letter]);
  }
  lcd.print(" ");
  delay(350);
}
```

EK- 2 Literatür özeti tablosu

Yazar adı	Çalışma başlığı	Çalışma yılı	Çalışma tipi	Kanat sayısı	Rotor çapı (m)	Rüzgar hızı (m/s)	Sonuç
Aized ve diğerleri	Design and analysis of wind pump for wind conditions in Pakistan	2019	Nümerik	16	3	3.5	Maksimum Cp değeri 0.35 ve günlük debi miktarı 25000 litre/gün olarak tespit edilmişti.
Awad	Practical Design and Testing of Wind Driven Water Pumping Systems	2019	Deneysel	24	2.5	3.5	Maksimum Cp değeri 0.49 ve günlük debi miktarı 26000 litre/gün olarak tespit edilmişti.
Prabkeao ve tantropiwat	Study on wind energy potential for agricultural water pumping system in the middle part of Thailand	2018	Teorik	30	4.2	2	Verilen rüzgar hızında günlük debi miktarı 12960 litre/gün olarak tespit edilmişti.
Adinoyi ve diğerleri	Development of Wind Powered Water Pump	2017	Deneysel	3	2.14	1.8-2.1	Verilen rüzgar hızlarında günlük debi miktarı 6062-8683 litre/gün olarak bulunmuştu.
Hendiriana ve diğerleri	Design and optimization of low speed horizontal-axis wind turbine using OpenFOAM	2015	Nümerik	6	7.5	4	Maksimum Cp değeri 0.52, güç = 400W olarak bulunmuştu , deneysel ve nümerik arasındaki fark %4 olarak tespit edilmişti.
Keawsuntia	A Study on Water Pumping by Using a Small Multi-Blades Windmill for Used in a Remote Area	2013	Deneysel	12	1	3	Maksimum Cp değeri 0.296, en iyi uç hız oranı 1,101 de sonuç vermiştir.
Mamaghani ve diğerleri	Computational Fluid Dynamics Analysis of Multi-Bladed Horizontal Axis Wind Turbine Rotor	2020	Nümerik	18	1	1-12	Maksimum Cp değeri 0.134, güç = 90W olarak bulunmuştur
Bayray ve diğerleri	Performance of wind pump prototype	2015	Deneysel	18	3.6	2.5-9	Maksimum Cp değeri 0.35, ölçülen günlük debi 8 m ve 12 m basma yüksekliği için sırasıyla 41 m ³ ve 30 m ³ idi